



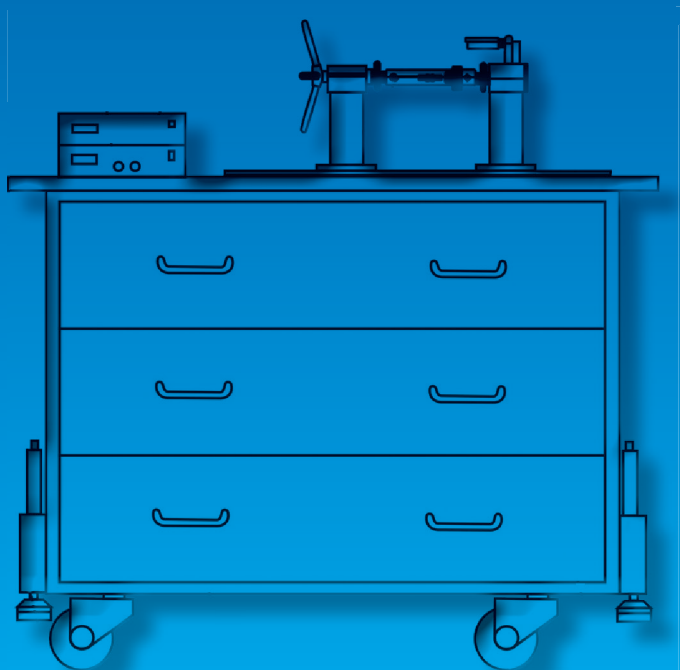
Уральский
федеральный
университет

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Институт
фундаментального
образования

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Лабораторный практикум



Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Лабораторный практикум

Рекомендовано методическим советом УрФУ
для студентов всех технических специальностей,
изучающих курс «Сопротивление материалов»

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2015

УДК 539.3/.6(076.5)

ББК 30.121я73-5

С64

Составители:

А. Н. Кислов, А. А. Поляков, Ф. Г. Лялина, О. С. Ковалев, В. В. Чупин,
Д. Е. Черногубов

Рецензенты:

кафедра конструкций, зданий и сооружений Уральской государственной
архитектурно-художественной Академии (завкаф. проф. Е. А. Голубева);
гл. науч. сотр., д-р техн. наук проф. И. Г. Емельянов (Институт машино-
ведения УрО РАН)

Научный редактор проф., д-р техн. наук А. А. Поляков

Сопротивление материалов : лабораторный практикум / сост. Кис-
С64 лов А. Н. [и др.]. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 128 с.

ISBN 978-5-7996-1558-1

В практикуме даны краткие сведения, необходимые в процессе выполнения
лабораторных работ в рамках курса «Сопротивление материалов». Приведены схе-
мы установок и приборов, которые используются в работах, описаны методы ис-
пытаний материалов, измерения напряжений и деформаций. Издание предназна-
чено для студентов всех специальностей.

Библиогр.: 2 назв. Рис. 29. Прил. 3.

УДК 539.3/.6(076.5)

ББК 30.121я73-5

ISBN 978-5-7996-1558-1

© Уральский федеральный
университет, 2015

Содержание

Предисловие	4
Лабораторная работа № 1 Проверка справедливости закона Гука и линейного закона распределения нормальных напряжений в поперечном сечении балки при изгибе.....	5
Лабораторная работа № 2 Изучение характера распределений напряжений в зоне расположения концентратора и определение коэффициента концентрации	17
Лабораторная работа № 3 Исследование напряженно-деформированного состояния консольного стержня равного сопротивления изгибу.....	26
Лабораторная работа № 4 Исследование напряженно-деформированного состояния в плоской раме ...	36
Лабораторная работа № 5 Определение значения опорной реакции статически неопределимой балки....	52
Лабораторная работа № 6 Определение перемещений при изгибе статически неопределимой рамы	62
Лабораторная работа № 7 Исследование напряжений в стержне большой кривизны	72
Лабораторная работа № 8 Определение напряжений и перемещений в круговой арке при изгибе.....	84
Лабораторная работа № 9 Исследование работы стержня при продольно-поперечном изгибе.....	92
Лабораторная работа № 10 Испытание тонкостенного стержня открытого профиля на изгиб и кручение.....	104
Приложение 1	117
Приложение 2	121
Приложение 3	125

Предисловие

В работе представлены учебные материалы, необходимые для теоретической подготовки к выполнению десяти лабораторных работ, предусмотренных соответствующей программой по курсу «Сопротивление материалов». Рассматриваются интересные вопросы, относящиеся к простым и сложным видам деформаций. Изучается напряженно-деформированное состояние в консольном стержне, в стержне большой кривизны, плоской раме и т. д. Выполнение лабораторных работ позволит студентам закрепить на практике полученные на лекциях теоретические знания. В приложениях приведены инструкции к техническим устройствам.

Данный практикум служит дополнением к существующим пособиям по сопротивлению материалов. В нем по каждой лабораторной работе даются краткие теоретические сведения, описываются используемые экспериментальные установки, приводятся требования к оформлению отчета. К лабораторным работам прилагаются отчеты (форму см. в конце каждой лабораторной работы), которые студенты заполняют при выполнении работ и сдают преподавателю.

Практикум может использоваться студентами в качестве базового при самостоятельной подготовке к выполнению лабораторных работ.

Лабораторная работа № 1

Проверка справедливости закона Гука и линейного закона распределения нормальных напряжений в поперечном сечении балки при изгибе

В данной работе рассматривается двутавровая балка, испытывающая чистый изгиб.

Цель работы — проверить закон Гука при изгибе; проверить линейный закон распределения нормальных напряжений в поперечном сечении балки при чистом изгибе.

1. Краткие теоретические сведения

Испытания на изгиб часто используются для оценки механических свойств материалов в хрупком или малопластичном состоянии, при воздействии коррозионной среды (коррозии под напряжением), а также для оценки пластичности и качества сварных соединений. Испытание на изгиб воспроизводит характерные для многих конструктивных элементов условия механического нагружения и позволяет изучать свойства поверхностных слоев, наиболее напряженных при разрушении.

Прямой изгибом называется такой вид деформации, при котором в поперечном сечении стержня возникает два внутренних силовых фактора: изгибающий момент и поперечная сила. В частном случае поперечная сила может быть равна нулю, тогда изгиб называется **чистым**. При изгибе возникает деформация, при которой происходит искривление оси прямого бруса или изменение кривизны кривого бруса. Брус, работающий при изгибе, называется **балкой**.

В данной лабораторной работе для проведения испытаний используют балку, у которой поперечное сечение имеет форму двутавра (рис. 1). Если начало координат поместить в центре тяжести сечения, то оси OZ и OY , как оси симметрии, будут *главными центральными осями*. Продольная ось балки — ось OX . При действии на балку сил, перпендикулярных оси OX и лежащих в плоскости YOX , которую принято называть *главной плоскостью*, балка будет изгибаться в этой плоскости. Такой изгиб называют **плоским изгибом**. Когда в сечениях балки M_z и Q_y не равны нулю, изгиб называют **поперечным**.

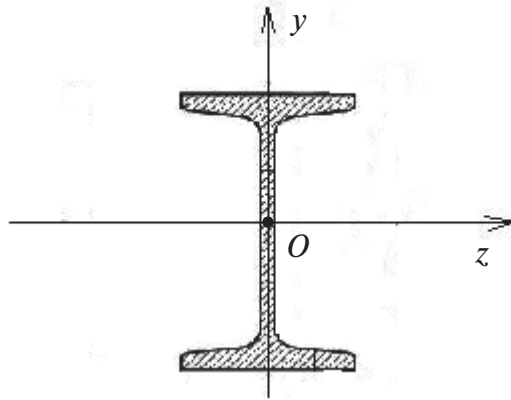


Рис. 1. Двутавровое поперечное сечение балки

При прямом изгибе балки в поперечных сечениях возникают нормальные и касательные напряжения. Нормальные напряжения связаны с изгибающим моментом, касательные напряжения связаны с поперечной силой. При прямом чистом изгибе касательные напряжения равны нулю. Нормальные напряжения в произвольной точке поперечного сечения балки определяются по формуле

$$\sigma_x = \frac{M_z}{I_z} y, \quad (1)$$

где M_z — изгибающий момент в рассматриваемом сечении; I_z — момент инерции поперечного сечения относительно нейтральной оси OZ ; y — расстояние от нейтральной оси до точки сечения, в которой вычисляют напряжение.

При выводе формулы (1) приняты гипотезы:

а) плоских сечений;

б) отсутствие боковых давлений ($\sigma_y = 0$).

Из формулы (1) видно, что нормальные напряжения по высоте сечения балки изменяются по линейному закону и достигают наибольшей величины в точках, наиболее удаленных от нейтральной оси:

$$\max \sigma = \frac{M_z}{I_z} y_{\max},$$

где y_{\max} — расстояние от наиболее удаленной точки до нейтральной оси.

Поскольку данное сечение симметрично относительно нейтральной оси, то наибольшие растягивающие и сжимающие напряжения одинаковы и определяются по формуле

$$\max \sigma = \frac{M_z}{W_z},$$

где W_z — осевой момент сопротивления сечения при изгибе.

При чистом изгибе напряжения σ_x , найденные по формуле (1), в растянутой зоне балки являются *главными напряжениями* σ_1 , а в сжатой зоне — σ_3 . Площадки, на которых они действуют, называют *главными площадками*, совпадающими с поперечным сечением балки. Знак напряжения σ_x определяют по физическому смыслу.

Для экспериментальной проверки линейного закона изменения нормальных напряжений по высоте балки в зоне чистого изгиба в девяти точках сечения наклеены девять тензорезисторов, с помощью которых определяют деформации ε_x на разных расстояниях от оси OX , а затем находят нормальные напряжения

$$\sigma_x = E \varepsilon_x, \quad (2)$$

где E — модуль упругости материала балки (модуль Юнга); ε_x — относительная продольная деформация рассматриваемого волокна.

2. Описание лабораторной установки

Внешний вид комплекса приведен на рис. 2. Комплекс представляет собой лабораторный стол с соответствующей наладкой (рис. 3), хранимой в одном из трех ящиков и устанавливаемой на столе при проведении лабораторной работы. Стол состоит из каркаса 7, встроенной установочной плиты 4 сварной конструкции с Т-образным пазом на верхней плоскости для закрепления элементов наладки 3, набора выдвижных ящиков 5 для хранения этих элементов, роликов (колес) 6 для удобства передвижения стола в пределах лаборатории и четырех опор 8 для установки стола по уровню перед проведением лабораторных работ.

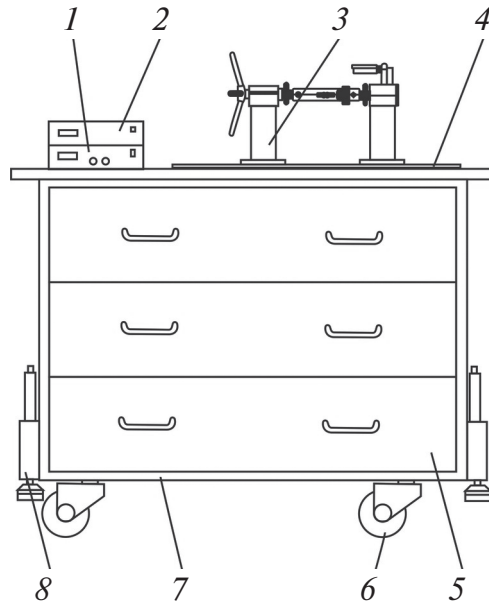


Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки

На столе находится измеритель деформации (ИД) 1 тензометрический цифровой ИДТЦ-01 (см. прил. 1) и блок измерения усилий (БИУ) 2 (см. прил. 2). При проведении лабораторных работ ИД и БИУ подключаются к источнику питания согласно паспортам.

Наладка, используемая в данной лабораторной работе, показана на рис. 3. На плите стола 4 установлен пресс винтовой 10, который за-

креплен двумя болтовыми соединениями (каждое соединение состоит из болта 2, гайки 3 и шайбы 4). Наладка включает в себя образец 12, представляющий собой двутавровую балку, имеющую на концах опоры 5 и 13, которые закреплены болтовыми соединениями на плите стола.

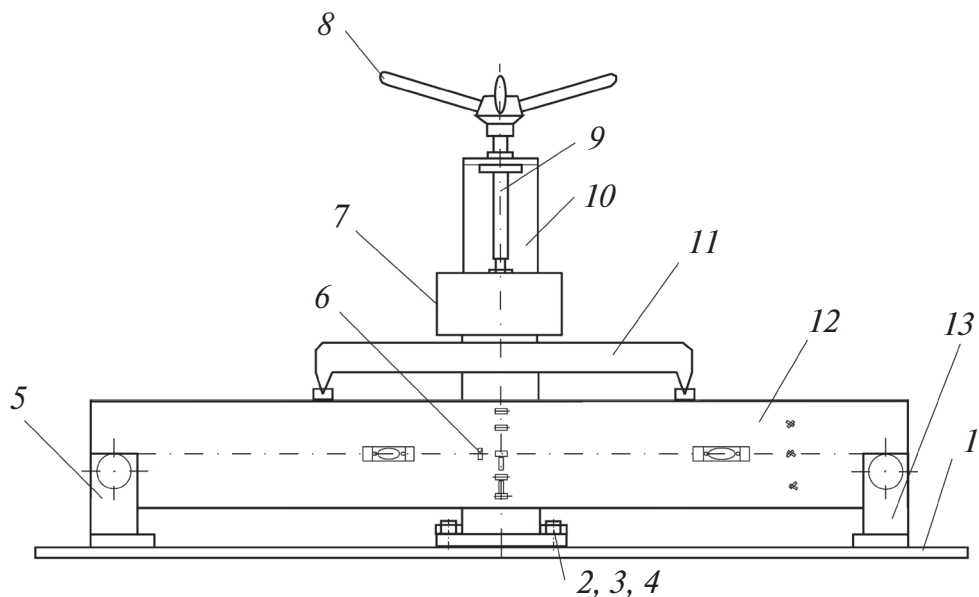


Рис. 3. Наладка:

1 — плита стола; 2 — болт; 3 — гайка; 4 — шайба; 5 — опора; 6 — тензорезисторы; 7 — датчик усилий до 5 кН; 8 — штурвал; 9 — нагружающий винт; 10 — пресс винтовой; 11 — планка прижимная; 12 — двутавровая балка; 13 — опора

На балке установлена планка прижимная 11 с закрепленным на ней датчиком усилий до 5 кН 7. Планка 11 служит для нагружения образца 12 нагружающим винтом 9 прессы 10 при помощи штурвала 8. В средней части пролета балки (зона чистого изгиба) наклеены девять тензорезисторов 6, фиксирующих деформации.

Технические характеристики изучаемой двутавровой балки:

длина рабочей части, мм.....	750±2
высота, мм	80±1
ширина полки, мм	32±1
толщина полки и стенки, мм.....	2±0,2
нагружающая сила, кН, не более	3
материал	сплав Д16 Т

3. Порядок выполнения работы

Работу выполняют в следующем порядке:

- 1) соберите наладку согласно рис. 3;
- 2) нагрузите балку предварительной силой $P = 0,5$ кН;
- 3) снимите показания ИД всех девяти тензорезисторов, наклеенных в зоне чистого изгиба. Значение силы контролируйте по показаниям БИУ;
- 4) нагружайте балку последовательно силой 1; 1,5; 2; 2,5 и 3 кН. На каждой ступени нагружения снимайте показания ИД для всех тензорезисторов и заносите в таблицу наблюдений;
- 5) снимите нагрузку;
- 6) определите среднюю разность Δn_i показаний ИД для каждого тензорезистора для ступени нагрузки $\Delta P = 0,5$ кН;
- 7) определите относительную деформацию для каждого тензорезистора по формуле

$$\varepsilon_x = K_\varepsilon \Delta n,$$

где K_ε — цена деления единицы дискретности ИД при измерении деформации;

- 8) вычислите нормальные напряжения для точек зоны чистого изгиба по формуле (2);
- 9) вычислите максимальные теоретические значения растягивающего и сжимающего напряжений в зоне чистого изгиба

$$\max \sigma = \pm \frac{M_z}{W_z};$$

- 10) постройте эпюру теоретических напряжений в сечении зоны чистого изгиба. Отметьте на ней точками значения экспериментальных напряжений в точках наклейки тензорезисторов;
- 11) сравните теоретические и экспериментальные значения напряжений и сделайте заключение о справедливости закона распределения нормальных напряжений по поперечному сечению изгибаемого стержня.

4. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) краткое изложение теоретических основ;
- 3) описание лабораторной установки и назначение отдельных блоков;
- 4) таблицу с первичным экспериментальным материалом;
- 5) вычисленные значения нормальных напряжений для точек зоны чистого изгиба;
- 6) эпюру теоретических напряжений в сечении зоны чистого изгиба с отмеченными значениями экспериментально полученных напряжений;
- 7) выводы по работе.

Перечень контрольных вопросов

1. Что называется плоским изгибом?
2. В чем разница между чистым и поперечным изгибом?
3. Какие напряжения возникают в поперечном сечении балки при чистом изгибе?
4. Как экспериментально определяются нормальные напряжения в поперечном сечении балки?
5. Как доказать, что при изгибе нормальные напряжения по высоте сечения меняются по линейному закону?

ОТЧЕТ О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ
Проверка справедливости закона Гука
и линейного закона распределения нормальных напряжений
в поперечном сечении балки при изгибе

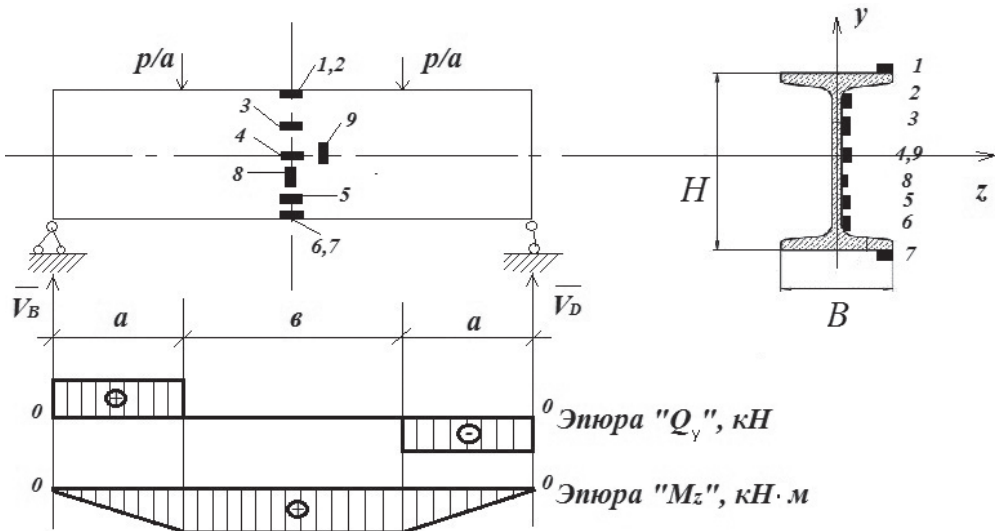
Цель работы: _____

Краткое изложение теоретических основ: _____

Измерительные приборы: _____

Цена единицы дискретности ИД при измерениях деформации $K_\epsilon =$ _____, модуль нормальной упругости $E =$ _____ МПа, расстояние между тензорезисторами _____ мм.

Схема образца лабораторной установки



$$a = \quad \text{м};$$

$$b = \quad \text{м};$$

$$H = \quad \text{м};$$

$$B = \quad \text{м};$$

$$I_z = \frac{BH^3}{12} = \quad = \quad \text{м}^4;$$

$$y_{\max} = \quad \text{м}.$$

Таблица наблюдений

№	Нагрузка, кН (показания БИУ)	Показания n_i ИД, мкОм/кОм (для i -го тензорезистора)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,5									
2	1,0									
3	1,5									
4	2,0									
5	2,5									
6	3,0									

Средняя разность Δn_i^{cp} показаний ИД на i -м тензорезисторе для ступени нагрузки $\Delta P = 0,5$ кН

$$\Delta n_i^{\text{cp}} = \frac{\sum_{j=1}^5 (n_i^{j+1} - n_i^j)}{5},$$

где n_i^j — показание ИД на i -м тензорезисторе при j -м нагружении; $i = 1, \dots, 9; j = 1, \dots, 5$.

$$\Delta n_1^{\text{cp}} = \quad \text{мкОм/кОм};$$

$$\Delta n_2^{\text{cp}} = \quad \text{мкОм/кОм};$$

$$\Delta n_3^{\text{cp}} = \quad \text{мкОм/кОм};$$

$$\Delta n_4^{\text{cp}} = \quad \text{мкОм/кОм};$$

$$\Delta n_5^{\text{cp}} = \quad \text{мкОм/кОм};$$

$\Delta n_6^{\text{cp}} =$	мкОм/кОм;
$\Delta n_7^{\text{cp}} =$	мкОм/кОм;
$\Delta n_8^{\text{cp}} =$	мкОм/кОм;
$\Delta n_9^{\text{cp}} =$	мкОм/кОм.

Относительная деформация ε_i около каждого тензорезистора:

$$\varepsilon_i = K_\varepsilon \Delta n_i^{\text{cp}},$$

$\varepsilon_1 =$;
$\varepsilon_2 =$;
$\varepsilon_3 =$;
$\varepsilon_4 =$;
$\varepsilon_5 =$;
$\varepsilon_6 =$;
$\varepsilon_7 =$;
$\varepsilon_8 =$;
$\varepsilon_9 =$.

Нормальное напряжение σ_i в i -й точке зоны чистого изгиба:

$$\sigma_i = E \varepsilon_i,$$

$\sigma_1 =$	МПа;
$\sigma_2 =$	МПа;
$\sigma_3 =$	МПа;
$\sigma_4 =$	МПа;
$\sigma_5 =$	МПа;
$\sigma_6 =$	МПа;
$\sigma_7 =$	МПа;
$\sigma_8 =$	МПа;
$\sigma_9 =$	МПа.

Максимальные теоретические значения растягивающего и сжимающего напряжений в зоне чистого изгиба

$$\max \sigma = \pm \frac{M_z^{\max}}{W_z},$$

где M_z — изгибающий момент; W_z — осевой момент сопротивления сечения балки.

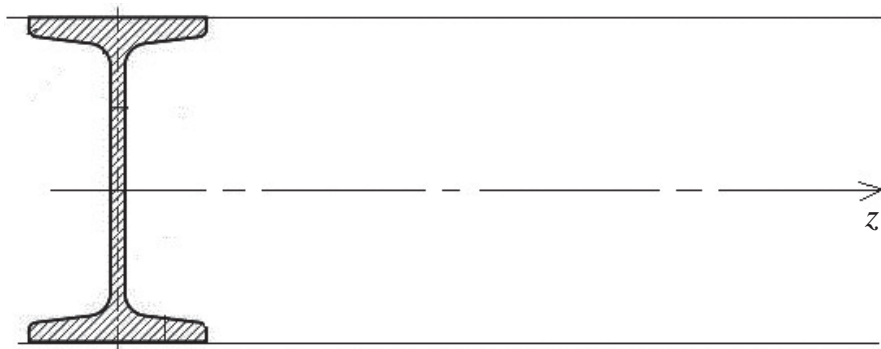
$$M_z^{\max} = \frac{P}{2} a = \quad \text{Н·м;}$$

$$W_z = \frac{I_z}{y_{\max}} = \quad \text{м}^3.$$

$$\max \sigma_p = + \frac{M_z^{\max}}{W_z} = \frac{PaH}{2I_z} = \frac{PaH}{4I_z} = \quad = \quad \text{Па;}$$

$$\max \sigma_c = - \frac{M_z^{\max}}{W_z} = - \frac{PaH}{4I_z} = \quad = \quad \text{Па.}$$

Эпюра теоретических напряжений в сечении зоны чистого изгиба. (Необходимо отметить значения экспериментальных напряжений в точках наклейки тензорезисторов.)



Выводы по работе _____

Отчет принял

Лабораторная работа № 2

Изучение характера распределений напряжений в зоне расположения концентратора и определение коэффициента концентрации

В данной работе рассматривается стержень прямоугольного поперечного сечения с концентратором напряжений при чистом изгибе (рис. 1).

Цель работы — экспериментально определить коэффициент концентрации напряжений, изучить характер распределения напряжений в зоне концентратора.

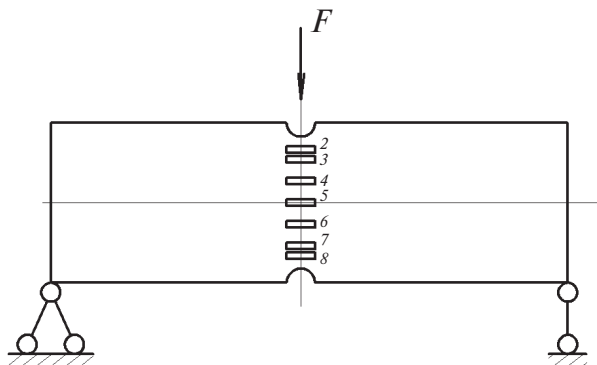


Рис. 1. Стержень прямоугольного поперечного сечения

1. Краткие теоретические сведения

Концентрацией напряжений называется явление резкого увеличения напряжений в зоне изменения конфигурации детали. Это изменение напряжений имеет локальный характер. Концентрация напряжений

может быть причиной разрушения тел. Факторами, обуславливающими концентрацию напряжений, могут быть надрезы, выточки, выбоины, полости, усадочные раковины, трещины, инородные включения, царапины и т. п. Количественной оценкой концентрации напряжений служит коэффициент концентрации напряжений K_m , определяемый по формуле

$$K_m = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ном}}}, \quad (1)$$

где σ_{\max} и $\sigma_{\text{ном}}$ — максимальное и номинальное напряжения в вырезах.

Номинальное напряжение $\sigma_{\text{ном}}$ — это напряжение, которое было бы при тех же нагрузках в теле без концентратора напряжений. Для стержня прямоугольного сечения напряжение $\sigma_{\text{ном}}$ в его сечении равно:

$$\sigma_{\text{ном}} = \frac{M_z}{W_z} = \frac{3Fl}{bh^2}, \quad (2)$$

где M_z — изгибающий момент в поперечном сечении; W_z — момент сопротивления сечения изгибу; F — сила, развиваемая нагружающим устройством; l — расстояние между опорами; b, h — размеры сечения исследуемого участка стержня; l — расстояние между опорами.

Например, для стержня прямоугольного сечения с двумя полукруглыми вырезами коэффициент K_m при изгибе зависит от параметра $2r/h$, где r — радиус выреза; h — высота стержня.

2. Описание лабораторной установки

Внешний вид комплекса приведен на рис. 2. Комплекс представляет собой лабораторный стол с соответствующей наладкой (рис. 3), хранимой в одном из трех ящиков и устанавливаемой на столе при проведении лабораторной работы. Стол состоит из каркаса 7, встроенной установочной плиты 4 сварной конструкции с Т-образным пазом на верхней плоскости для закрепления элементов наладки 3, набора выдвижных ящиков 5 для хранения этих элементов, роликов (колес) 6 для удобства передвижения стола в пределах лаборатории и четырех

опор 8 для установки стола по уровню перед проведением лабораторных работ. На столе находится измеритель деформации (ИД) 1 тензометрический цифровой ИДТЦ-01 (см. прил. 1) и блок измерения усилий (БИУ) 2 (см. прил. 2). При проведении лабораторных работ ИД и БИУ подключаются к источнику питания согласно паспортам.

Нижеследующее описание наладки определяет исходное состояние комплекса, подготовленного к проведению на нем лабораторных работ. Наладка, используемая в данной лабораторной работе, показана на рис. 3. Установите на плите стола 1 по центру пресс винтовой 11 и закрепите болтовыми соединениями болт 2, гайку 3, шайбу 4.

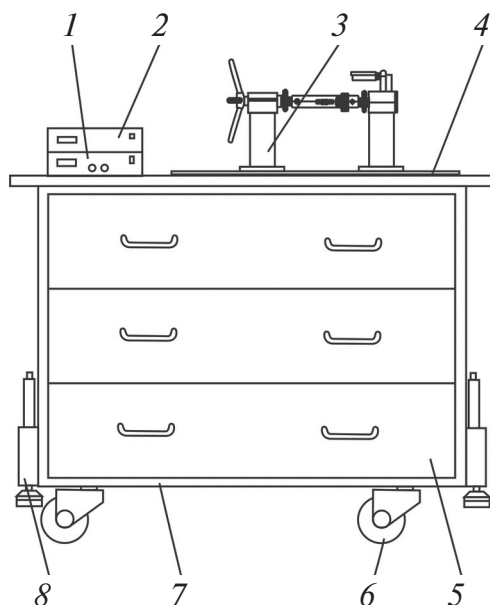


Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки

Образец 13, представляющий собой двутавровую балку, имеющую в зоне чистого изгиба прямоугольное сечение, а на концах — опоры 5 и 14, закрепите болтовыми соединениями к плите стола 1. Планка прижимная 12 с закрепленным на ней датчиком 8 усилий до 5 кН служит для нагружения образца нагружающим винтом прессы 11 со штурвалом 9. В среднем сечении зоны чистого изгиба балки имеются два симметрично расположенных полукруглых выреза, являющихся концентраторами напряжений. По высоте сечения наклеены тензорезисторы 7, концы которых выведены на разъем 6.

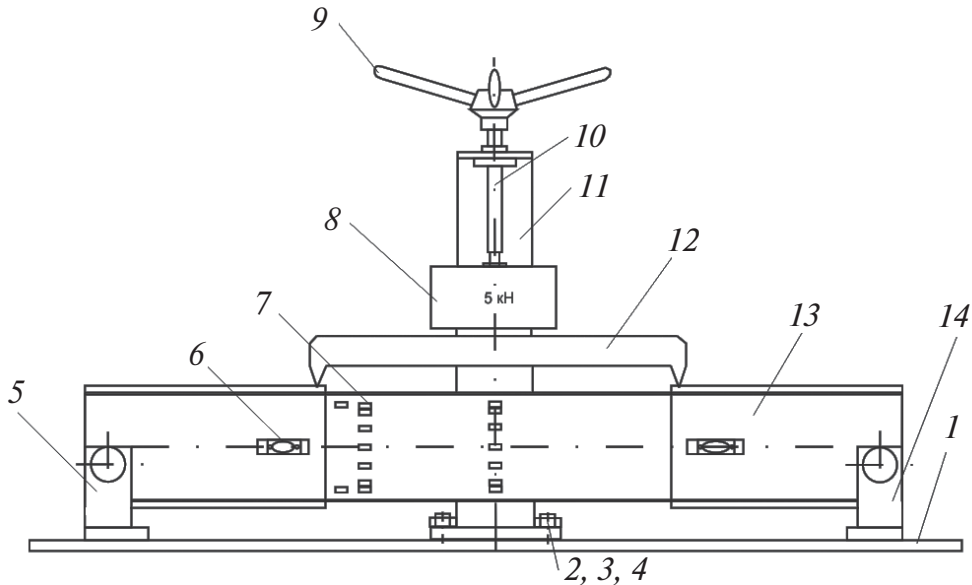


Рис. 3. Наладка:

1 — плита стола; 2 — болт; 3 — гайка; 4 — шайба; 5 — опора; 6 — разъем; 7 — тензорезисторы; 8 — датчик усилий до 5 кН; 9 — штурвал; 10 — нагружающий винт; 11 — пресс винтовой; 12 — планка прижимная; 13 — двутавровая балка; 14 — опора

Технические характеристики изучаемой двутавровой балки:

длина рабочей части, мм.....	750±2,0
высота сечения в районе концентратора напряжений, мм	90±1,0
ширина сечения, мм	4±0,2
нагружающая сила, Н, не более	5
материал	сталь 10

3. Порядок выполнения работы

Работу следует выполнять в следующем порядке:

- 1) соберите наладку согласно рис. 3 и произведите предварительное нагружение силой $F = 0,5$ кН;
- 2) снимите показания ИД со всех тензорезисторов в районе концентратора напряжений;
- 3) последовательно нагрузите балку силой 2,5; 4,5 кН, контролируя значение силы по блоку измерения усилий (БИУ);

- 4) на каждом уровне нагружения снимайте показания ИД в соответствии с п. 2;
- 5) определите среднюю разность Δn показаний ИД по каждому тензорезистору для ступени нагрузки $\Delta F = 2,0$ кН;
- 6) определите деформацию во всех точках, соответствующую приращению силы $\Delta F = 2,0$ кН, по формуле

$$\varepsilon_i = K_\varepsilon \cdot \Delta n_i,$$

где K_ε — цена деления единицы дискретности ИД при измерениях деформации;

- 7) определите напряжения во всех точках, соответствующие $\Delta F = 2,0$ кН, по формуле

$$\sigma = E\varepsilon_i,$$

где E — модуль нормальной упругости стали, $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа;

- 8) найдите номинальные значения напряжений используя формулу 2;
- 9) подсчитайте коэффициент концентрации K_m по формуле (1).

4. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) краткое изложение теоретических основ;
- 3) описание лабораторной установки и назначение отдельных блоков;
- 4) таблицу с первичным экспериментальным материалом;
- 5) вычисленные значения нормальных напряжений для точек зоны чистого изгиба;
- 6) эпюру теоретических напряжений в сечении зоны чистого изгиба с отмеченными значениями экспериментально полученных напряжений;
- 7) выводы по работе.

Перечень контрольных вопросов

1. Что называют концентрацией напряжений?
2. Какой характер имеет изменение напряжений в зоне конфигурации детали?
3. От какого параметра зависит коэффициент концентрации напряжений при изгибе?
4. По какой формуле определяется номинальное напряжение в сечении стержня?

ОТЧЕТ О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Изучение характера распределений напряжений в зоне расположения концентратора и определение коэффициента концентрации

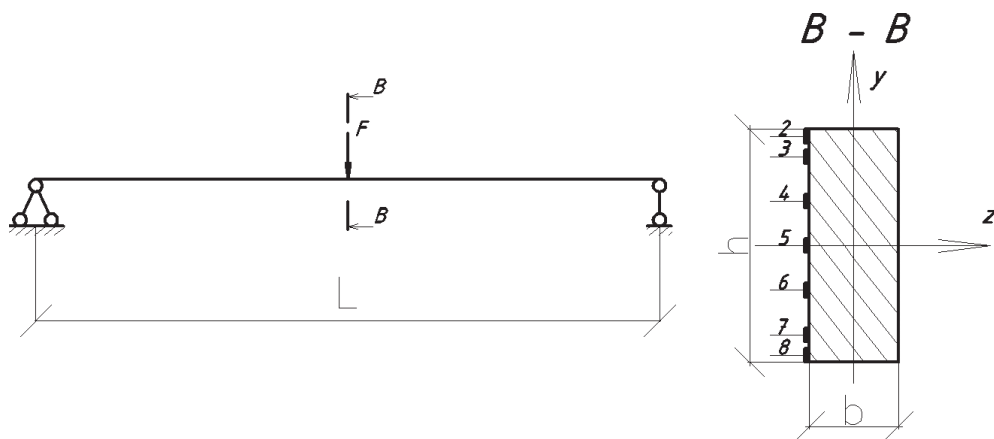
Цель работы: _____

Краткое изложение теоретических основ: _____

Измерительные приборы: _____

Цена единицы дискретности ИД при измерениях деформации $K_\epsilon =$,
модуль Юнга $E =$ МПа.

Схема образца лабораторной установки



$L =$ мм; $h =$ мм; $b =$ мм.

$$W_z = \frac{bh^2}{6} = \quad \text{мм}^3.$$

Таблица наблюдений

Нагрузка, кН (пока- зания БИУ)	Показания n_i ИД, мкОм/кОм (для i -го тензорезистора)						
	2	3	4	5	6	7	8
0,5							
2,5							
4,5							
	$\Delta n_2^{\text{cp}} =$	$\Delta n_3^{\text{cp}} =$	$\Delta n_4^{\text{cp}} =$	$\Delta n_5^{\text{cp}} =$	$\Delta n_6^{\text{cp}} =$	$\Delta n_7^{\text{cp}} =$	$\Delta n_8^{\text{cp}} =$

Средняя разность $\Delta n_i^{\text{cp}} =$ показаний ИД на i -м тензорезисторе для ступени нагрузки $\Delta F = 2,0$ кН

$$\Delta n_i^{\text{cp}} = \frac{\sum_{j=1}^2 (n_i^{j+1} - n_i^j)}{2},$$

где n_i^j — показание ИД на i -м тензорезисторе при j -м нагружении; $i = 1, \dots, 8; j = 1, \dots, 2$.

Определяем деформации в точках стержня, где наклеены тензорезисторы:

$$\varepsilon_i = \Delta n_i^{\text{cp}} K_\varepsilon,$$

$$\varepsilon_2 = \quad = \quad ;$$

$$\varepsilon_3 = \quad = \quad ;$$

$$\varepsilon_4 = \quad = \quad ;$$

$$\varepsilon_5 = \quad = \quad ;$$

$$\varepsilon_6 = \quad = \quad ;$$

$$\varepsilon_7 = \quad = \quad ;$$

$$\varepsilon_8 = \quad = \quad .$$

Определяем напряжения в точках стержня, где наклеены тензорезисторы:

$$\sigma_i = \Delta n_i^{\text{сп}} K_\varepsilon E ,$$

$$\sigma_2 = \quad = \quad \text{Па;}$$

$$\sigma_3 = \quad = \quad \text{Па;}$$

$$\sigma_4 = \quad = \quad \text{Па;}$$

$$\sigma_5 = \quad = \quad \text{Па;}$$

$$\sigma_6 = \quad = \quad \text{Па;}$$

$$\sigma_7 = \quad = \quad \text{Па;}$$

$$\sigma_8 = \quad = \quad \text{Па.}$$

Находим номинальное значение напряжения по формуле

$$\sigma_{\text{ном}} = \frac{M_z}{W_z} = \frac{3Fl}{bh^2} = \quad .$$

Коэффициент концентрации определяем по формуле

$$K_m = \frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_{\text{ном}}} = \quad .$$

Выводы по работе _____

Отчет принял

Лабораторная работа № 3

Исследование напряженно-деформированного состояния консольного стержня равного сопротивления изгибу

В данной работе рассматривается консольный стержень равного сопротивления изгибу (рис. 1).

Цель работы — исследовать напряженно-деформированное состояние стержня равного сопротивления изгибу и сделать заключение о возможности его использования для градуировки электронных измерителей деформации, работающих с тензорезисторами.

1. Краткие теоретические сведения

В стержне (балке) постоянного сечения, размеры которого подобраны по наибольшему изгибающему моменту, материал используется нерационально. Действительно, только в крайних (наиболее удаленных от нейтральной оси) точках опасного поперечного сечения такой балки нормальные напряжения могут быть равны допускаемым; во всех остальных точках балки нормальные напряжения меньше допускаемых. С точки зрения расхода материала более рациональными могут быть *балки переменного сечения*.

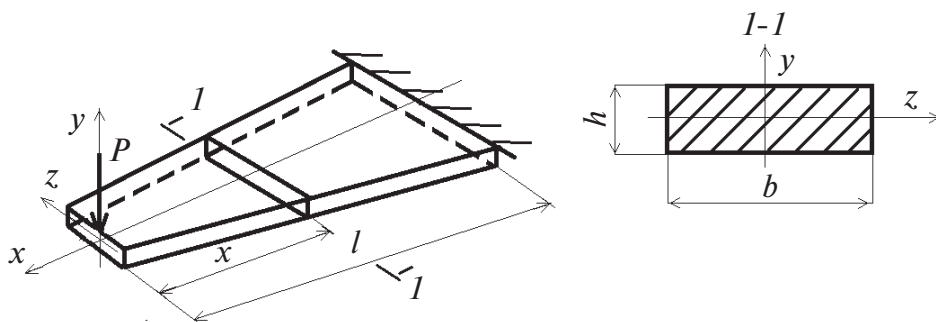


Рис. 1. Стержень равного сопротивления изгибу

Проверочный расчет балки переменного сечения заключается в проверке выполнения условия прочности для нескольких сечений, так как в балке переменного сечения опасным может оказаться не только поперечное сечение, в котором действует наибольший (по абсолютной величине) изгибающий момент, а какое-либо другое сечение.

Частным случаем балок переменного сечения являются балки равного сопротивления изгибу (равнопрочные балки). Стержень, во всех сечениях которого максимальное напряжение одинаково и не превышает допускаемое, называется **стержнем равного сопротивления изгибу** (рис. 1). Условие, определяющее форму такого стержня, можно получить из условия прочности

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}(x)}{W} = \text{const} \leq [\sigma],$$

где σ_{\max} — максимальное напряжение в сечении; M_{\max} — изгибающий момент; W — момент сопротивления; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение.

Отсюда получается выражение для момента сопротивления W , через которое мы можем определять размеры сечений,

$$W = \frac{|M|}{[\sigma]}.$$

Изменение W зависит от нагрузки.

Стержень равного сопротивления изгибу имеет переменное поперечное сечение, боковые грани сходятся в точке, где прикладывается сосредоточенная сила P . При этих условиях напряжение и деформация в направлении оси стержня в области переменного поперечного сечения постоянны

$$\sigma_x = \frac{M_z}{W_z} = \frac{Pz}{\left(\frac{bzh^2}{6l}\right)} = \frac{6Pl}{bh^2};$$

и

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} = \frac{6Pl}{Ebh^2}, \quad (1)$$

где P — сила, приложенная в точке схождения боковых граней стержня; l — длина стержня; b — ширина поперечного сечения у заделки; h — высота поперечного сечения.

Деформацию ε_x необходимо связать с перемещением точки приложения силы, для этого можно использовать интеграл Мора

$$f = \frac{Pl^3}{2EI_z},$$

где f — прогиб балки в точке приложения силы P ; I_z — осевой момент инерции площади поперечного сечения стержня у заделки,

$$I_z = \frac{bh^3}{12}.$$

После преобразований выражения (1) получим

$$\varepsilon_x = \frac{fh}{l^2} = \text{const.}$$

2. Описание лабораторной установки

Внешний вид комплекса приведен на рис. 2. Комплекс представляет собой лабораторный стол с соответствующей наладкой (рис. 3), хранимой в одном из трех ящиков и устанавливаемой на столе при проведении лабораторной работы. Стол состоит из каркаса 7, встроенной установочной плиты 4 сварной конструкции с Т-образным пазом на верхней плоскости для закрепления элементов наладки 3, набора выдвижных ящиков 5 для хранения этих элементов, роликов (колес) 6 для удобства передвижения стола в пределах лаборатории и четырех

опор 8 для установки стола по уровню перед проведением лабораторных работ. На столе находится измеритель деформации (ИД) 1 тензометрический цифровой ИДТЦ-01 (см. прил. 1) и блок измерения усилий (БИУ) 2 (см. прил. 2). При проведении лабораторных работ ИД и БИУ подключаются к источнику питания согласно паспортам.

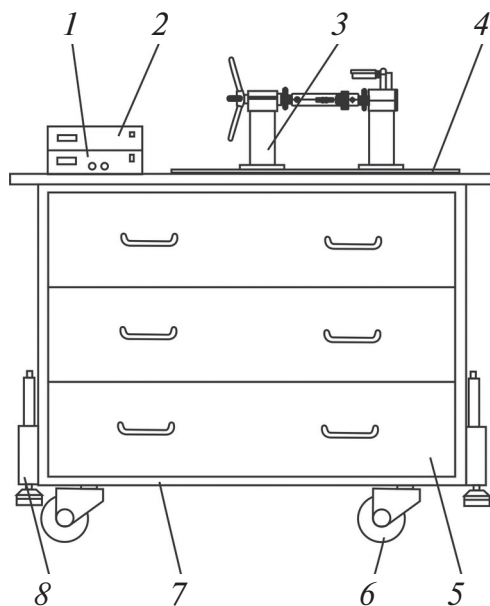


Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки

Нижеследующее описание наладки определяет исходное состояние комплекса, подготовленного к проведению на нем лабораторных работ. Наладка, используемая в данной лабораторной работе, показана на рис. 3. На плите стола 2 установлен стержень 3, один из концов которого закреплен болтовым соединением — болтом 1, а к другому концу приложена микрометрическая головка 4.

Технические характеристики изучаемого консольного стержня:

длина рабочей части, мм.....	300±1,0
ширина основания стержня, мм	40±0,1
толщина, мм.....	5±0,1
нагружающая сила, Н, не более	15
материал	сталь 45

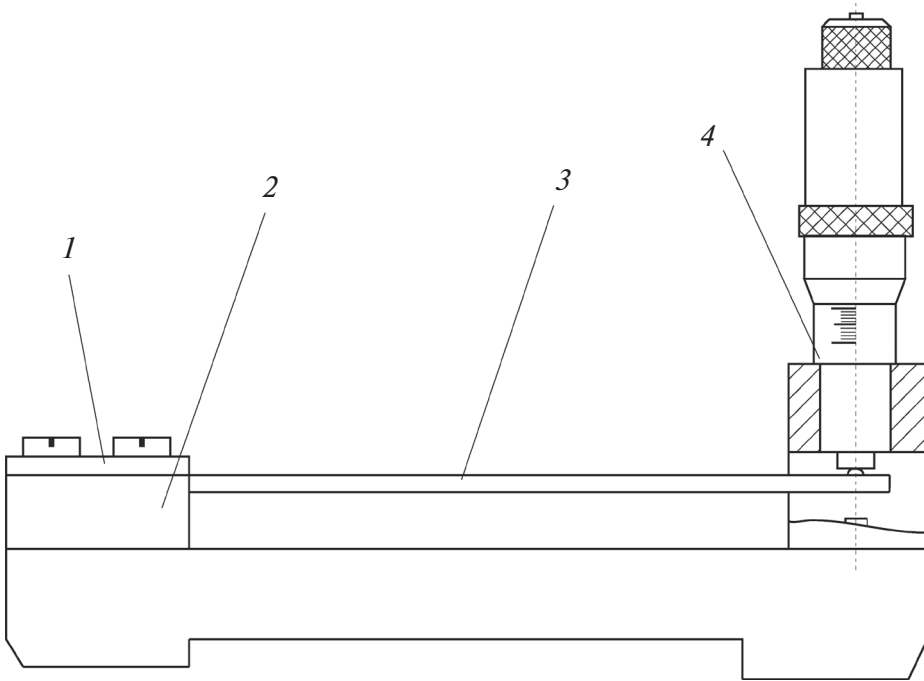


Рис. 3. Наладка:

1 — болтовое соединение; 2 — плита стола; 3 — стержень равного сопротивления;
4 — микрометрическая головка

3. Порядок выполнения работы

Порядок выполнения лабораторной работы таков:

- 1) соберите наладку согласно рис. 3;
- 2) подключите к стержню ИД;
- 3) задайте винтом микрометрической головки 4 (см. прил. 3) перемещение, равное 0,50 мм;
- 4) снимите показания по табло ИД для всех тензорезисторов и занесите их в таблицу наблюдений;
- 5) последовательно деформируйте стержень микрометрическим винтом до значения перемещений 1,50; 2,50 и 3,50 мм. На каждом уровне деформации снимайте показания табло ИД и заносите их в таблицу наблюдений;
- 6) подсчитайте среднюю разность показаний ИД, соответствующую перемещению 1,00 мм;

- 7) при известной цене единицы дискретности шкалы ИД можно вычислить деформацию и напряжение в точках стержня, где наклеены тензорезисторы;
- 8) при неизвестной цене единицы дискретности шкалы ИД можно ее определить и использовать в других лабораторных работах, где используются тензорезисторы;
- 9) замените балку равного сопротивления на балку из другого материала;
- 10) произведите манипуляции по п. 3–8.

4. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) краткое изложение теоретических основ;
- 3) описание лабораторной установки и назначение отдельных блоков;
- 4) таблицу с первичным экспериментальным материалом;
- 5) расчет средней разности показаний ИД, соответствующей перемещению 1,00 мм;
- 6) вычисление деформации и напряжений в точках стержня, где наклеены тензорезисторы;
- 7) определение цены дискретности шкалы ИД;
- 9) выводы по работе.

Перечень контрольных вопросов

1. Какие балки являются более рациональными по расходу материала?
2. Что называют стержнями равного сопротивления изгибу?
3. В каком случае нормальные напряжения могут быть равны допускаемым?
4. В чем заключается проверочный расчет балки переменного сечения?
5. В какой точке сходятся боковые грани стержня равного сопротивления изгибу?
6. Как можно определить размеры сечений стержня?

ОТЧЕТ О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ
Исследование напряженно-деформированного состояния
консольного стержня равного сопротивления изгибу

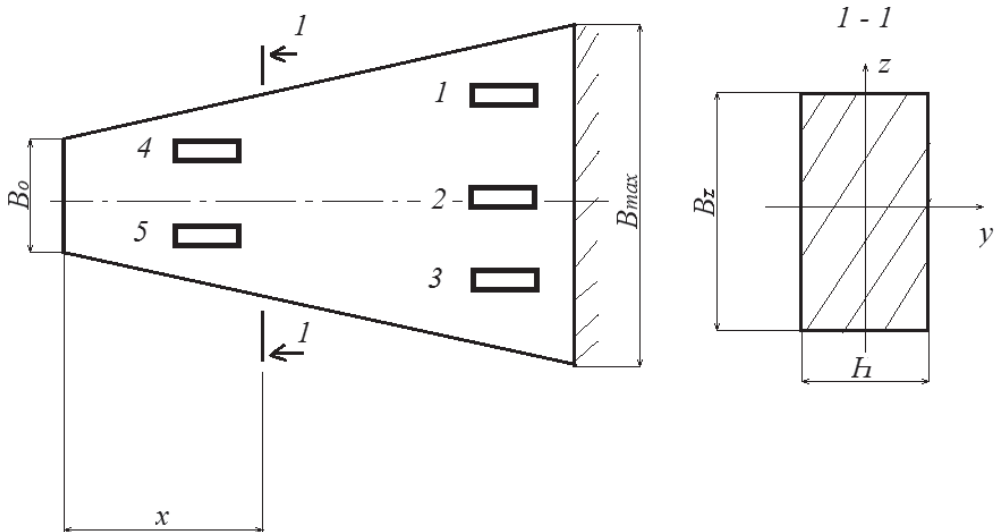
Цель работы: _____

Краткое изложение теоретических основ: _____

Измерительные приборы: _____

Цена единицы дискретности ИД при измерениях деформации $K_\epsilon =$ _____, модуль Юнга $E =$ _____ МПа.

Схема образца и его размеры



$B_0 =$ _____ мм; $B_{\max} =$ _____ мм; $h =$ _____ мм; $B_z =$ _____ мм.

Осевой момент инерции поперечного сечения стержня у заделки

$$I_z = \frac{B_z h^3}{12} = \text{---} = \text{мм}^4.$$

Нагрузка $P = H$.

Таблица наблюдений

Показания микрометр. головки, мм	Показания n_i ИД, мкОм/кОм (для i -го тензорезистора)				
	1	2	3	4	5
0,5					
1,5					
2,5					
3,5					
	$\Delta n_1^{\text{cp}} =$	$\Delta n_2^{\text{cp}} =$	$\Delta n_3^{\text{cp}} =$	$\Delta n_4^{\text{cp}} =$	$\Delta n_5^{\text{cp}} =$

Средняя разность $\Delta n_i^{\text{cp}} =$ показаний ИД на i -м тензорезисторе, соответствующая перемещению 1,00 мм:

$$\Delta n_i^{\text{cp}} = \frac{\sum_{j=1}^3 (n_i^{j+1} - n_i^j)}{3},$$

где n_i^j — показание ИД на i -м тензорезисторе при j -м нагружении; $i = 1, \dots, 5; j = 1, \dots, 3$.

Опытные значения величин

Деформации в точках стержня, где наклеены тензорезисторы:

$$\varepsilon_i = \Delta n_i^{\text{cp}} K_\varepsilon,$$

$$\varepsilon_1 = \text{---} = \text{---};$$

$$\varepsilon_2 = \text{---} = \text{---};$$

$$\varepsilon_3 = \text{---} = \text{---};$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_4 &= &= & ; \\ \varepsilon_5 &= &= & .\end{aligned}$$

Напряжения в точках стержня, где наклеены тензорезисторы:

$$\sigma_i = \Delta n_i^{\text{cp}} K_\varepsilon E ,$$

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= &= & \text{Па;} \\ \sigma_2 &= &= & \text{Па;} \\ \sigma_3 &= &= & \text{Па;} \\ \sigma_4 &= &= & \text{Па;} \\ \sigma_5 &= &= & \text{Па.}\end{aligned}$$

Теоретические значения величин

$$\sigma^B = \frac{6Pl}{bh^2} = \text{-----} = \text{-----} \text{ Па;}$$

$$\varepsilon^B = \frac{\sigma^B}{E} = \text{-----} = \text{-----} .$$

Сравнение теоретических и экспериментально полученных значений

$$\delta = \frac{\sigma^B - \sigma}{\sigma^B} 100\% = \text{-----} = \text{-----} \%;$$

$$\delta = \frac{\varepsilon^B - \varepsilon}{\varepsilon^B} 100\% = \text{-----} = \text{-----} \%.$$

Определение цены единицы дискретности ИД с помощью полученных значений, вычисленных теоретически:

$$K_{\varepsilon} = \frac{\sigma^B}{\Delta n_{\text{cp}} E} = \quad = \quad ;$$

$$K_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon^B}{\Delta n_{\text{cp}}} = \quad = \quad .$$

Выводы по работе _____

Отчет принял

Лабораторная работа № 4

Исследование напряженно-деформированного состояния в плоской раме

В данной работе рассматриваются две плоские рамы П-образного контура с постоянным сечением одинаковой жесткости: статически определимая рама (рис. 1, *а*) и статически неопределимая рама (рис. 1, *б*).

Цель работы:

- 1) определить перемещения в статически определимой раме и реакции опоры в статически неопределимой раме;
- 2) определить и сопоставить напряжения, возникающие в статически определимой и неопределимой рамах под действием приложенных сил P , а также сравнить теоретические результаты с экспериментальными данными.

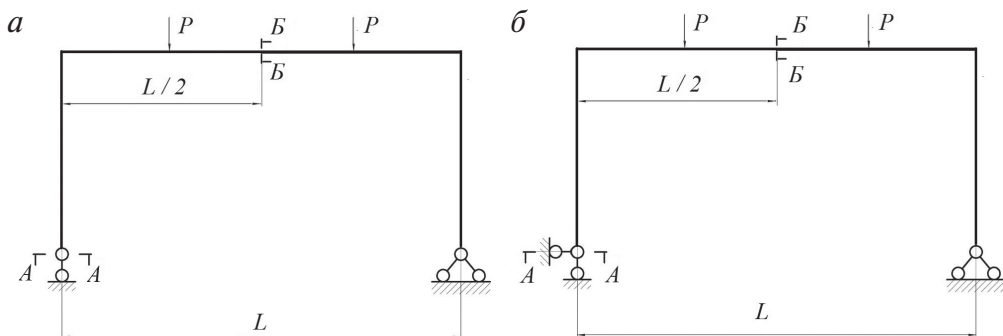


Рис. 1. Статически определимая (*а*) и неопределимая рама (*б*)

В ходе работы в статически определимой раме находятся перемещения в двух сечениях А-А и Б-Б, а также напряжение в сечении Б-Б. В статически неопределимой раме находятся перемещение, напряжение в сечении Б-Б и горизонтальная реакция опоры в сечении А-А.

1. Краткие теоретические сведения

Рамой называют стержневую систему, у которой все или некоторые узловые соединения являются жесткими. Жесткий узел характеризуется тем, что угол между осями стержней, которые его образуют, не изменяется при действии нагрузки. Рамы могут быть плоскими, когда все оси стержней лежат в одной плоскости, в противном случае — пространственными. Горизонтальный стержень рамы называют **ригелем**, а стержни, его поддерживающие, называют **стойками**. Рамы могут быть простыми, состоящими из трех стержней, сложными, многопролетными и многоярусными. Также они подразделяются на статически определимые, когда число неизвестных реакций, усилий равно числу независимых уравнений статики, которые могут быть составлены для данной рамы, и статически неопределимые, если это условие не выполняется.

В отличие от балок, в рамах, наряду с изгибающими моментами M , поперечной силой Q , возникает еще и продольная сила N . Определение усилий (M , Q , N) выполняется, как и в балках, посредством метода сечений. При этом правило знаков для изгибающего момента M и поперечной силы Q такое же, как для балок, а для продольной силы N — как в стержнях при растяжении-сжатии. Определение нормальных σ и касательных напряжений τ производится по тем же зависимостям, что и в балках, если стержень испытывает изгиб.

Число связей, наложенных на неопределимую систему, больше того количества связей, которые обеспечивают геометрическую неизменяемость системы. **Геометрически неизменяемой системой** называют такую систему, которая может изменять свою форму только за счет деформации ее элементов. Для обеспечения геометрической неизменяемости рамы (балки) в плоскости достаточно трех связей. Каждая связь запрещает какое-либо перемещение. Шарнирно-подвижная опора запрещает перемещение по направлению, перпендикулярному к плоскости опирания, и является одной связью. Шарнирно-неподвижная опора делает невозможными линейные перемещения по двум взаимно перпендикулярным направлениям (вертикальное и горизонтальное) и соответствует двум связям, наложенным на систему. При наличии жесткой заделки на конце стержня становятся невозможными перемещения: вертикальное и горизонтальное, а также поворот. По-

зей от совместного действия внешней нагрузки и неизвестных усилий должны быть равны нулю.

Для случая, рассматриваемого в данной лабораторной работе, степень статической неопределимости рамы равна

$$n = 4 - 3 = 1,$$

где 4 — число неизвестных реакций; 3 — число независимых уравнений статики, которые можно составить для заданной системы.

Таким образом, каноническое уравнение метода сил имеет вид

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1p} = 0,$$

где δ_{11} — относительное перемещение в основной системе по направлению действия силы X_1 от действия силы $\bar{X}_1 = 1$; Δ_{1p} — относительное перемещение по направлению действия неизвестной X_1 , вызванное заданной нагрузкой.

Наиболее общие формулы для определения перемещений в упругих стержневых системах были получены немецким ученым Мором. Для отыскания перемещения δ (прогиба или угла поворота) в произвольном сечении плоской рамы вне зависимости от того, приложена в этом сечении соответствующая обобщенная сила или нет, необходимо построить эпюры изгибающих моментов для основной системы от заданной внешней нагрузки P и от единичных усилий $\bar{X}_n = 1$, приложенных в направлении отброшенных связей. Таким образом, коэффициенты канонических уравнений, представляющие собой перемещения точек системы в направлении отброшенных связей, можно найти посредством интеграла Мора

$$\delta_{ik} = \delta_{ki} = \sum_{i=1}^n \int \frac{\bar{M}_i \bar{M}_k}{EI} dx,$$

где \bar{M}_k — значения эпюр изгибающих моментов от единичной силы $\bar{X}_k = 1$ на соответствующем участке; k — причина, вызывающая перемещение i .

$$\Delta_{ip} = \sum_{i=1}^n \int \frac{\overline{M}_i \cdot M_p}{EI} dx,$$

где n — число участков рамы длиной l ; i — направление перемещения; \overline{M}_i — значения эпюр изгибающих моментов от единичной силы $\overline{X}_i = 1$ на соответствующем участке; M_p — значение эпюры изгибающего момента от внешней нагрузки P ; EI — жесткость стержневой системы.

Графоаналитический метод вычисления интеграла Мора для определения упругих перемещений был предложен в 1925 г. А. Н. Верещагиным. Метод состоит в перемножении эпюр внутренних силовых факторов и используется для определения перемещения в том случае, если одна из эпюр (функций в интеграле Мора) линейная, тогда интеграл Мора будет равен произведению площади грузовой эпюры (от внешней нагрузки) на ординату линейной эпюры от единичной нагрузки, взятую под центром тяжести грузовой эпюры.

2. Описание лабораторной установки

Внешний вид комплекса приведен на рис. 2. Комплекс представляет собой лабораторный стол с соответствующей наладкой (рис. 3), хранимой в одном из трех ящиков и устанавливаемой на столе при проведении лабораторной работы. Стол состоит из каркаса 7, встроенной установочной плиты 4 сварной конструкции с Т-образным пазом на верхней плоскости для закрепления элементов наладки 3, набора выдвижных ящиков 5 для хранения этих элементов, роликов (колес) 6 для удобства передвижения стола в пределах лаборатории и четырех опор 8 для установки стола по уровню перед проведением лабораторных работ. На столе находится измеритель деформации (ИД) 1 тензометрический цифровой ИДТЦ-01 (см. прил. 1) и блок измерения усилий (БИУ) 2 (см. прил. 2). При проведении лабораторных работ ИД и БИУ подключаются к источнику питания согласно паспортам.

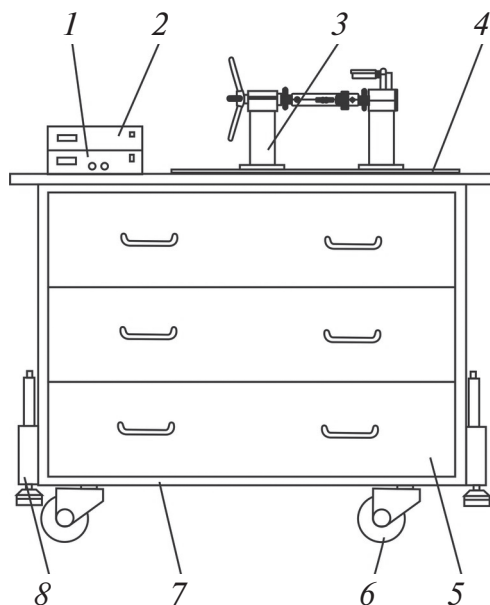


Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки

Нижеследующее описание наладки определяет исходное состояние комплекса, подготовленного к проведению на нем лабораторных работ. Наладка, используемая в данной лабораторной работе, показана на рис. 3. На плите стола *11* установлена рама *4* в сборе с подшипниковыми опорными узлами, которая закреплена болтовым соединением — болтом *12*, гайкой *13*, шайбой *14*.

На горизонтальную часть рамы в заданных по условию работы местах подвешиваются серьги *8*, к которым прикрепляются подвесы *9*. На эти подвесы можно класть грузы *10* — по две гири на каждый подвес. На плите стола также установлена высокая индикаторная стойка *7*, закрепленная болтовым соединением. На ней закреплена индикаторная головка *6* так, чтобы ножка индикаторной головки опиралась на раму и делила горизонтальную часть примерно пополам.

Шток кронштейна *1* может выдвигаться для прикрепления к нему датчика усилий до $0,05$ кН. Кронштейн *1* установлен на плите стола *11* так, чтобы винт датчика усилий своим шарниром упирался в ось *3* подвижной опоры рамы. Кронштейн закреплен болтовым соединением. В отверстие стойки корпуса подвижной опоры вставлена индикаторная головка *5*. Система выставлена и закреплена так, чтобы ножка индикатора опиралась на планку оси подвижной опоры.

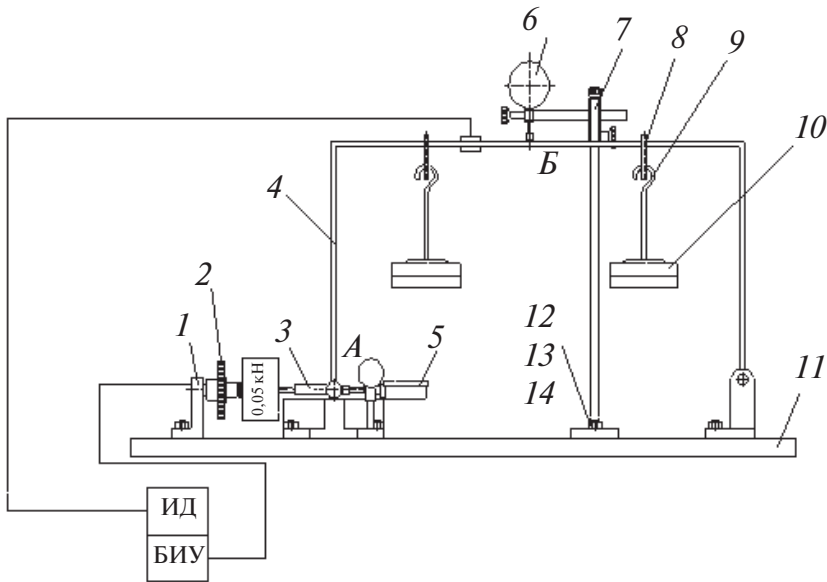


Рис. 3. Наладка:

1 — шток кронштейна; 2 — гайка; 3 — ось подвижной опоры рамы; 4 — рама; 5 — индикаторная головка в сечении А-А; 6 — индикаторная головка в сечении Б-Б; 7 — индикаторная стойка; 8 — серьги; 9 — подвесы; 10 — гири; 11 — плита стола; 12 — болт; 13 — гайка; 14 — шайба; ИД — измеритель деформации; БИУ — блок измерения усилий

Технические характеристики изучаемой рамы:

длина вертикальных стержней, мм	265±1
длина горизонтальных стержней, мм.....	520±1
высота сечения стержней, мм.....	5±0,2
ширина сечения стержней, мм.....	30±1,0
нагружающая сила, Н, не более	50
материал	сталь 20

3. Порядок выполнения работы

Порядок выполнения работы следующий:

- 1) соберите статически неопределимую раму согласно рис. 3;
- 2) снимите показания индикатора 6, закрепленного в сечении Б-Б, а также показания ИД для двух тензорезисторов в сечении Б-Б и БИУ в сечении А-А;

- 3) нагрузите раму двумя силами $P = 20$ Н на расстоянии 14 см от каждого края ригеля (согласно рис. 1, б) и снимите показания приборов, указанных в п. 2;
- 4) вычислите горизонтальную составляющую реакций опоры в сечении А-А как разность показаний БИУ;
- 5) определите вертикальное перемещение в сечении Б-Б рамы как разность показаний индикатора 14;
- 6) определите деформацию и напряжение в сечении Б-Б рамы по показаниям ИД;
- 7) превратите раму в статически определимую, отведя датчик усилий от подвижной опоры вращением гайки 2 (рис. 3);
- 8) снимите показания индикаторов 5 и 6, закрепленных в сечениях А-А и Б-Б соответственно, и показания ИД для обоих тензорезисторов;
- 9) нагрузите раму двумя силами $P = 20$ Н на расстоянии 14 см от каждого края ригеля (согласно рис. 1, а) и снимите показания приборов, перечисленных в п. 8;
- 10) определите горизонтальное перемещение подвижной опоры в сечении А-А как разность показаний индикатора 5;
- 11) определите вертикальное перемещение в сечении Б-Б рамы как разность показаний индикатора 6;
- 12) определите деформацию и напряжение в сечении Б-Б статически определимой рамы;
- 13) определите отношение максимальных напряжений в сечении Б-Б статически определимой и неопределимой рам, полученных экспериментально;
- 14) постройте эпюры изгибающих моментов для статически неопределимой и определимой рам. Вычислите теоретически величины, которые были определены экспериментально и сравните их значения.

4. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) краткое изложение теоретических основ;

- 3) схему и размеры рам;
- 4) таблицу с первичным экспериментальным материалом;
- 5) полученные величины горизонтальной составляющей реакции неподвижной опоры в сечении А-А, горизонтального перемещения подвижной опоры в сечении А-А и вертикальных перемещений в сечении Б-Б;
- 6) значения деформаций и напряжений в сечении Б-Б в статически определимой и неопределимой системах;
- 7) отношение максимальных напряжений в сечении Б-Б статически определимой и неопределимой систем, полученных экспериментально;
- 8) эпюры изгибающих моментов для статически определимой и неопределимой рам;
- 9) вычисление теоретических значений величин и сравнение их с опытными данными;
- 10) вывод по работе.

Перечень контрольных вопросов

1. Что такое рама? Какие типы рам вы знаете?
2. Какие рамы называют статически определимыми и неопределимыми?
3. Чем обусловлена статическая неопределимость систем?
4. Какие связи называются лишними?
5. Как определить степень статической неопределимости?
6. Какая система называется заданной, а какая — эквивалентной?
7. В чем заключается суть метода сил?
8. Каков физический смысл канонических уравнений метода сил?
9. Каков смысл коэффициентов канонических уравнений?
10. Как экспериментально определяются деформация и перемещение сечений рамы?
11. Как теоретически определить напряжения в элементах статически неопределимой рамы?

ОТЧЕТ О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Исследование напряженно-деформируемого состояния в плоской раме

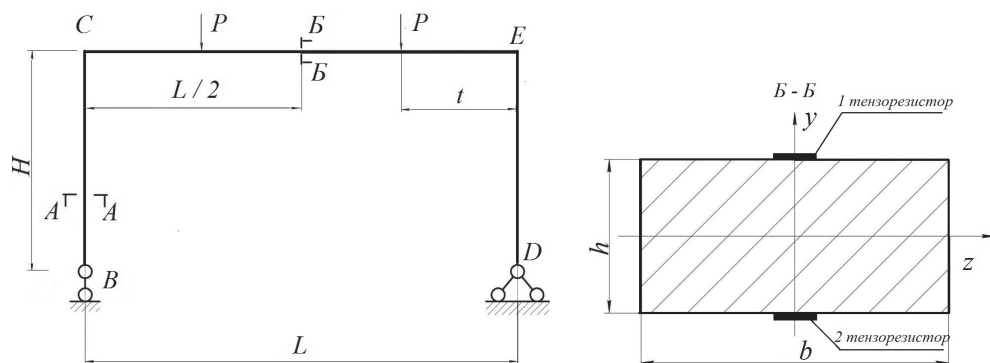
Цель работы: _____

Краткое изложение теоретических основ: _____

Измерительные приборы: _____

Цена единицы дискретности ИД при измерениях деформации $K_\varepsilon =$.

Схема нагружения рам и их размеры



$L =$ мм; $t =$ мм; $H =$ мм;

$h =$ мм; $b =$ мм.

Нагрузка $P =$ Н;
модуль Юнга $E =$ МПа.

Геометрические характеристики сечения А-А и Б-Б рам:

$$W_z = \frac{bh^2}{6} = \quad \text{мм}^3.$$

Таблица наблюдений № 1

Статически неопредели- мая рама	Показания индикатора, 0,01 мм	Показания БИУ, кН·10 ²	Показания ИД в сеч. Б-Б, мкОм/кОм	
	Сечение Б-Б	Сечение А-А	1 тензорезистор	2 тензорезистор
Без нагрузки				
С нагрузкой				

Таблица наблюдений № 2

Статически определимая рама	Показания индикатора, 0,01 мм		Показания ИД в сеч. Б-Б, мкОм/кОм	
	Сечение А-А	Сечение Б-Б	1 тензорезистор	2 тензорезистор
Без нагрузки				
С нагрузкой				

Опыт для статически неопределимой рамы

Горизонтальная составляющая реакций опоры H_A как разность показаний БИУ:

$$H_A = H_2 - H_1 = \quad \text{кН},$$

где H_2 — показание БИУ в сечении А-А с нагрузкой; H_1 — показание БИУ в сечении А-А без нагрузки.

Вертикальное перемещение рамы в сечении Б-Б как разность показаний индикатора δ :

$$y^{\bar{}} = y_2 - y_1 = \quad \text{мм},$$

где y_1 — показание индикатора в сечении Б-Б без нагрузки; y_2 — показание индикатора в сечении Б-Б с нагрузкой.

Деформация в сечении Б-Б по показаниям ИД:

$$\varepsilon = \Delta n_{\text{ср}} K_{\varepsilon} = \quad ,$$

$$\text{где } \Delta n_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^2 \Delta n_i}{2} = \quad .$$

Среднее арифметическое приращение показаний Δn_i по двум тензорезисторам:

$$\Delta n_1 = n_{1 \text{ с нагр}} - n_{1 \text{ без нагр}} = \quad ;$$

$$\Delta n_2 = n_{2 \text{ с нагр}} - n_{2 \text{ без нагр}} = \quad .$$

Напряжение в сечении Б-Б по показаниям ИД:

$$\sigma_1^H = \Delta n_1 K_{\varepsilon} E = \quad \text{Па};$$

$$\sigma_2^H = \Delta n_2 K_{\varepsilon} E = \quad \text{Па}.$$

Опыт для статически определимой рамы

Горизонтальное перемещение подвижной опоры А-А как разность показаний индикатора 5:

$$x_A^0 = x_2 - x_1 = \quad \text{мм},$$

где x_2 — показание индикатора в сечении А-А с нагрузкой; x_1 — показание индикатора в сечении А-А без нагрузки.

Вертикальное перемещение рамы в сечении Б-Б как разность показаний индикатора b :

$$y_B^0 = y_2 - y_1 = \quad \text{мм},$$

где y_2 — показание индикатора в сечении Б-Б с нагрузкой; y_1 — показание индикатора в сечении Б-Б без нагрузки.

Деформация в сечении Б-Б по показаниям ИД:

$$\varepsilon = \Delta n_{\text{ср}} K_\varepsilon = \quad ,$$

где

$$\Delta n_1 = n_{1 \text{ с нагр}} - n_{1 \text{ без нагр}} = \quad ;$$

$$\Delta n_2 = n_{2 \text{ с нагр}} - n_{2 \text{ без нагр}} = \quad .$$

Напряжение в сечении Б-Б по показаниям ИД:

$$\sigma_1^0 = \Delta n_1 K_\varepsilon E = \quad = \quad \text{Па};$$

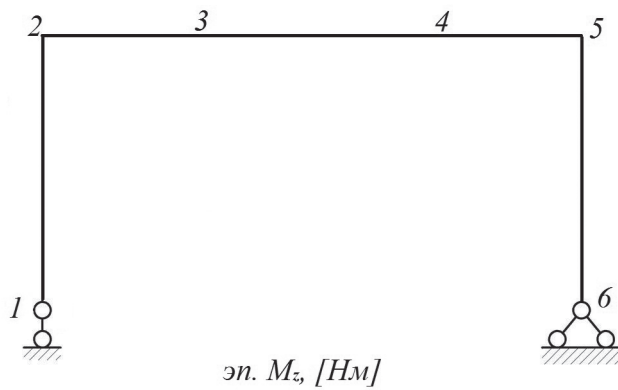
$$\sigma_2^0 = \Delta n_2 K_\varepsilon E = \quad = \quad \text{Па}.$$

Отношение максимальных напряжений в сечении Б-Б статически определимой и неопределимой систем, полученных экспериментально

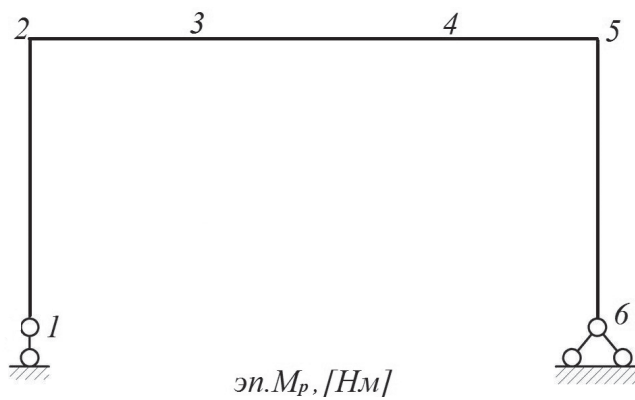
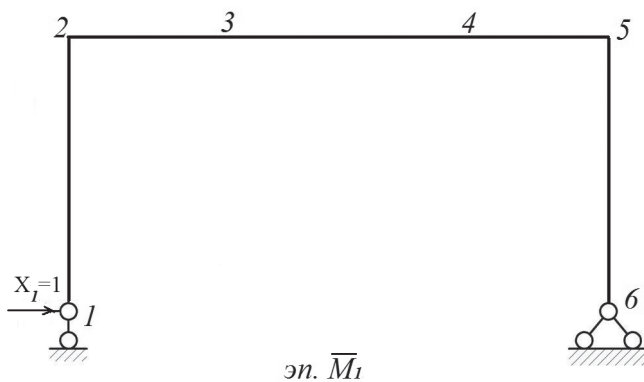
$$\frac{\sigma_1^0}{\sigma_1^H} = \quad ;$$

$$\frac{\sigma_2^0}{\sigma_2^H} = \quad .$$

Эпюра изгибающих моментов для статически определимой рамы



Эпюры изгибающих моментов для статически неопределимой рамы



Каноническое уравнение метода сил

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1p} = 0,$$

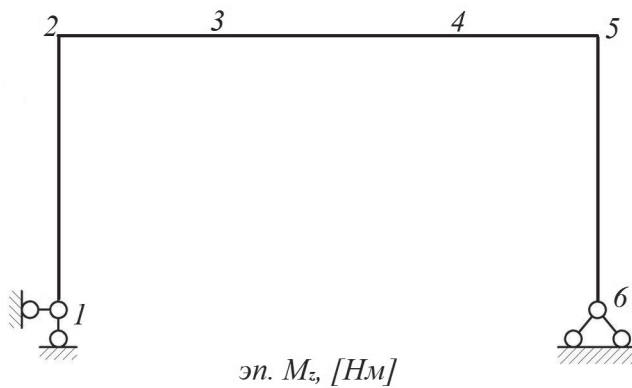
где

$$\delta_{11} = \sum_{i=1}^n \int \frac{\overline{M}_1 \cdot \overline{M}_1}{EI} dx = \quad ;$$

$$\Delta_{1p} = \sum_{i=1}^n \int \frac{\overline{M}_1 \cdot M_p}{EI} dx = \quad ,$$

откуда

$$X_1 = \quad .$$



Теоретические значения величин

$$\sigma'' = \frac{M_{\text{изг}}}{W_z} = \quad \text{Па},$$

где $M_{\text{изг}}$ — значение изгибающего момента в соответствующем сечении; W_z — момент сопротивления.

Сравнение теоретических и экспериментально полученных значений напряжений

$$\delta = \frac{\sigma'' - \sigma}{\sigma''} \cdot 100 \% = \quad \quad \quad \%$$

Выводы по работе _____

Отчет принял

Лабораторная работа № 5

Определение значения опорной реакции статически неопределимой балки

В данной работе рассматривается статически неопределимая балка (рис. 1).

Цель работы — определить опытным путем значения неизвестной опорной реакции в статически неопределимой балке и сравнить ее с теоретическим значением.

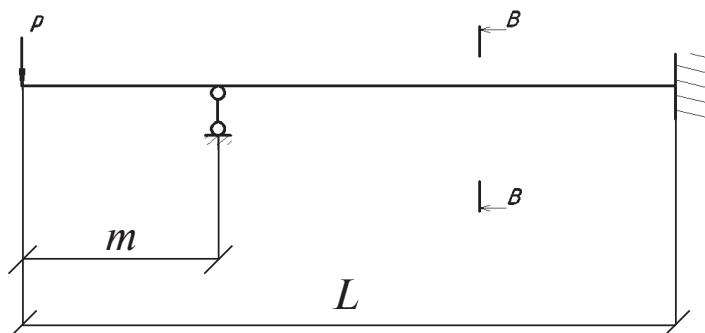


Рис. 1. Статически неопределимая балка

В ходе работы определяется реакция опоры в сечении В-В. Значение, полученное экспериментальным путем, необходимо сравнить с теоретическим.

1. Краткие теоретические сведения

Статически неопределимой называется система, в которой число неизвестных усилий больше числа независимых уравнений статики, которые можно составить для данной системы. Разницу между числом

неизвестных усилий (реакций) и числом независимых уравнений статики называют **степень статической неопределимости** системы. Связями, наложенными на статически неопределимую систему, могут быть как опорные связи, так и стержни самой конструкции. Например в балках связями, обеспечивающими геометрическую неизменяемость, являются опорные закрепления (опорные связи). Для обеспечения геометрической неизменяемости балки в плоскости достаточно трех связей. Каждая связь запрещает какое-то перемещение.

Шарнирно-подвижная опора (рис. 2, а) запрещает перемещение по направлению, перпендикулярному плоскости опирания, и является одной связью. Шарнирно-неподвижная (рис. 2, б) опора делает невозможными линейные перемещения по двум взаимно-перпендикулярным направлениям (вертикальное и горизонтальное) и соответствует двум связям, наложенным на конструкцию. При наличии жесткого защемления (рис. 2, в) на конце стержня становятся невозможными все перемещения: и вертикальное, и горизонтальное, и угол поворота. Поэтому жесткое защемление представляет собой три связи, обеспечивающие геометрическую неизменяемость балки.

Каждая дополнительная связь сверх трех для плоских систем превращает конструкцию в статически неопределимую. Такие дополнительные связи, которые не являются необходимыми для обеспечения геометрической неизменяемости конструкции, называются **лишними**. Удаление лишней (лишних) связи превращает статически неопределимую систему в статически определимую и *геометрически неизменяемую* (изменяющую свою форму и размеры только вследствие деформации элементов).

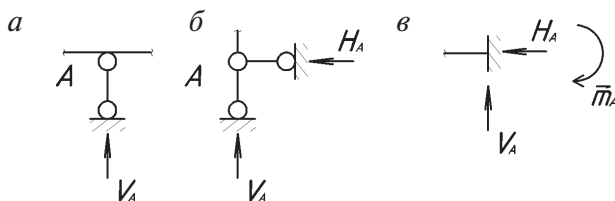


Рис. 2. Опорные связи:

а — шарнирно-подвижная опора; б — шарнирно-неподвижная опора;
в — жесткое защемление

Расчет статически неопределимых балок, как правило, включает в себя выбор так называемых основных систем. **Основная система** —

это статически определяемая и геометрически неизменяемая балка, полученная из заданной, путем отбрасывания «лишних» связей. Усилия в лишних связях находятся из дополнительных уравнений — уравнений совместимости деформаций. Смысл этих уравнений состоит в отрицании перемещений по направлению отброшенных связей. Математически это условие для балки с одной лишней связью записывается в виде канонического уравнения

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1p} = 0. \quad (1)$$

где δ_{11} , Δ_{1p} — перемещения в основной системе по направлению отброшенной связи от $\bar{X}_1 = 1$ и от заданной нагрузки P соответственно; X_1 — усилие в лишней связи.

Отбросив связь в точке опоры и обозначив реакцию связи через X_1 , построим эпюры изгибающих моментов от силы $\bar{X}_1 = 1$ и P , затем по формуле Мора вычислим перемещения, входящие в уравнение (1):

$$\delta_{11} = \int \frac{\bar{M}_1 \cdot \bar{M}_1}{EI} dx,$$

$$\Delta_{1p} = \int \frac{\bar{M}_1 \cdot M_p}{EI} dx.$$

2. Описание лабораторной установки

Внешний вид комплекса приведен на рис. 3. Комплекс представляет собой лабораторный стол с соответствующей наладкой (рис. 4), хранимой в одном из трех ящиков и устанавливаемой на столе при проведении лабораторной работы. Стол состоит из каркаса 7, встроенной установочной плиты 4 сварной конструкции с Т-образным пазом на верхней плоскости для закрепления элементов наладки 3, набора выдвижных ящиков 5 для хранения этих элементов, роликов (колес) 6 для удобства передвижения стола в пределах лаборатории и четырех

опор 8 для установки стола по уровню перед проведением лабораторных работ. На столе находится измеритель деформации (ИД) 1 тензометрический цифровой ИДТЦ-01 (см. прил. 1) и блок измерения усилий (БИУ) 2 (см. прил. 2). При проведении лабораторных работ ИД и БИУ подключаются к источнику питания согласно паспортам.

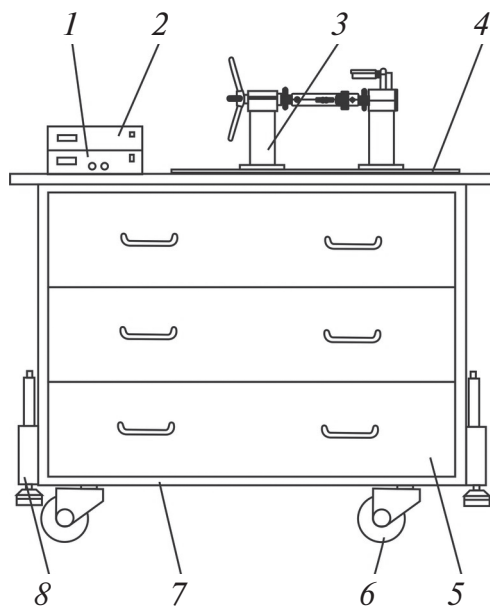


Рис. 3. Внешний вид лабораторной установки

Нижеследующее описание наладки определяет исходное состояние комплекса, подготовленного к проведению на нем лабораторных работ. Наладка, используемая в данной лабораторной работе, показана на рис. 4. Установите на плиту стола 13 опорную стойку 7 и закрепите болтовыми соединениями — болт 10, гайка 11, шайба 12. Вставьте осевой конец подшипникового узла образца — балки в сборе 2 в отверстие стойки 7 и закрепите центральным болтом 8 рукоятки 9.

Установите опорную стойку 19 под корпусом 1 свободного конца балки 2, выверните опорный винт 18 до соприкосновения с корпусом 1 и зафиксируйте контргайкой. Закрепите стойку 19 к плите стола 13 болтовым соединением. Установите на плиту стола две высокие индикаторные стойки 5 и 4 и закрепите их болтовыми соединениями.

Установите на стойки 5 и 4 индикаторные головки так, чтобы ножки крайних индикаторов опирались на стойки корпусов балки 2,

3. Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется в следующем порядке:

- 1) соберите наладку согласно рис. 4;
- 2) снимите показания с индикатора прогибомера 3 в сечении В-В и БИУ;
- 3) подвесьте на консоль балки груз 20 Н;
- 4) снимите показания БИУ и индикатора прогибомера 3;
- 5) определите реакцию опоры и вертикальное перемещение балки в сечении В-В как разность показаний БИУ и прогибомера соответственно;
- 6) произведите теоретический расчет перемещения балки X_1 ;
- 7) сравните результаты эксперимента и расчета.

4. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) краткое изложение теоретических основ;
- 3) схема и размеры балки;
- 4) таблицу с первичным экспериментальным материалом;
- 5) полученное значение реакции опоры и перемещение балки в сечении В-В;
- 6) вычисление теоретического значения и сравнение его с полученным экспериментально;
- 7) вывод по работе.

Перечень контрольных вопросов

1. Какую систему называют статически неопределимой?
2. Какую систему называют основной?
3. В чем состоит смысл уравнений совместимости деформаций?
4. Что такое степень статической неопределимости?
5. Какие связи вы знаете?
6. Какую систему называют геометрически неизменяемой?
7. Какие связи называют лишними?
8. Как находятся усилия в лишних связях?

ОТЧЕТ О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

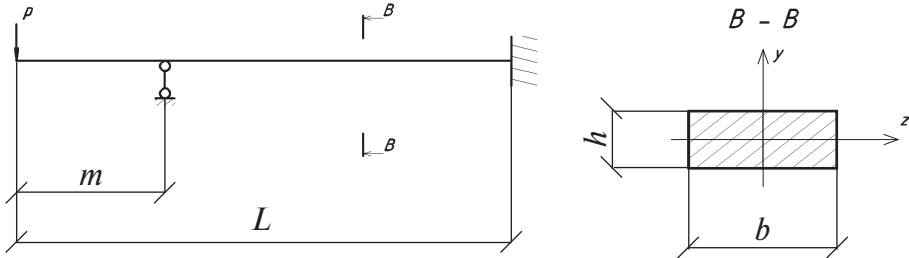
Определение значения опорной реакции статически неопределимой балки

Цель работы: _____

Краткое изложение теоретических основ: _____

Измерительные приборы: _____

Схема нагружения балки и ее размеры

 $L =$ мм; $m =$ мм; $h =$ мм; $b =$ мм; $P =$ Н;модуль Юнга $E =$ МПа.

Геометрические характеристики сечения В-В балки:

 $b =$ мм; $h =$ мм;

$$W_z = \frac{bh^2}{6} = \text{мм}^3.$$

Таблица наблюдений

Нагрузка, Н	Показания прогибомера	Показания БИУ, кН·10 ²
0		
20		

Вертикальное перемещение $X^{\text{оп}}$ рамы в сечении В-В как разность показаний прогибомера:

$$X^{\text{оп}} = y_2 - y_1 = \quad \text{мм},$$

где y_2 — показание прогибомера в сечении В-В с нагрузкой; y_1 — показание прогибомера в сечении В-В без нагрузки.

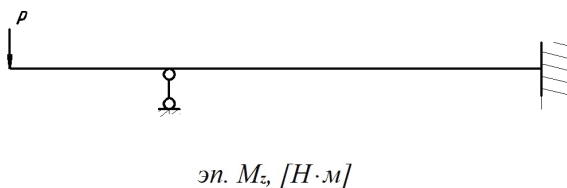
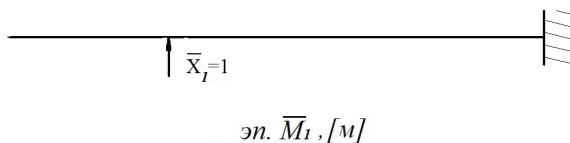
Реакция опоры $R^{\text{оп}}$ определяется как разность показания БИУ

$$R^{\text{оп}} = V_2 - V_1 = \quad \text{кН},$$

где V_2 — показания БИУ с нагрузкой; V_1 — показания БИУ без нагрузки.

Теоретические значения величин

Эпюры изгибающих моментов для статически неопределимой балки



Каноническое уравнение метода сил

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1p} = 0,$$

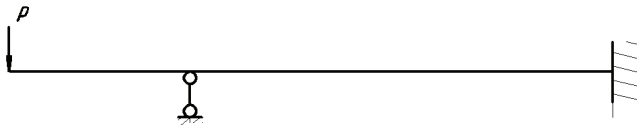
где

$$\delta_{11} = \int \frac{\overline{M}_1 \overline{M}_1}{EI} dx = \quad ;$$

$$\Delta_{1p} = \int \frac{\overline{M}_1 M_p}{EI} dx = \quad ,$$

отсюда

$$X_1 = X = \quad .$$



эн. M_z , $[H \cdot m]$

Сравнение теоретического и экспериментально полученного значений:

$$\delta = \frac{X - X_{\text{оп}}}{X} \cdot 100 \% = \quad \%.$$

Выводы по работе _____

Отчет принял

Лабораторная работа № 6

Определение перемещений при изгибе статически неопределимой рамы

Цель работы — экспериментально проверить расчетные значения прогиба ригеля и угла поворота опорного сечения статически неопределимой рамы при изгибе.

1. Краткие теоретические сведения

Определение прогиба ригеля

На рис. 1 изображена расчетная схема рамы, а также показаны эпюры для определения вертикального перемещения ригеля. Внешнюю силу $\Delta P_1 = 10 \text{ Н}$ прикладываем в точке C (в $1/3$ пролета ригеля); вертикальный прогиб будем вычислять в точке D . Здесь же показано поперечное сечение рамы.

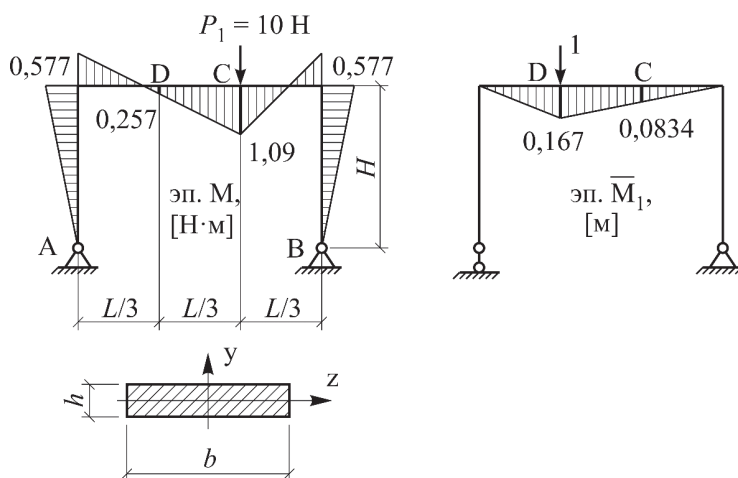


Рис. 1. Расчетная схема рамы

Вертикальное перемещение точки D

$$\Delta_D = \Sigma \int_l \frac{\bar{M}_1 M}{EI} dx ,$$

где \bar{M}_1 — единичная эпюра изгибающих моментов от вертикальной единичной силы, приложенной в точке D ; M — эпюра изгибающих моментов для заданной рамы, полученная в результате расчета статически неопределимой системы.

Вертикальное перемещение ригеля в точке D получают перемножением эпюр, изображенных на рис. 1. Поскольку при вычислении Δ_D имеем на ригеле 3 участка эпюры длиной $L/3$, то перемножение рекомендуется выполнять по формуле трапеции

$$\frac{l}{6EI} (2M^л M_1^л + 2M^{пр} M_1^{пр} + M^л M_1^{пр} + M^{пр} M_1^л) ,$$

где $M^л$ — левая ордината эпюры; $M^{пр}$ — правая ордината.

Определение угла поворота опорного сечения

Угол поворота правого опорного сечения B определим при загрузке левой стойки рамы внешней нагрузкой $\Delta P_2 = 5$ Н, приложенной на расстоянии 0,15 м от ригеля.

На рис. 2 показана расчетная схема рамы. На ней M и \bar{M}_2 окончательная и единичная эпюры изгибающих моментов для определения угла поворота правого опорного сечения.

Угол поворота правого опорного сечения

$$\varphi_B = \Sigma \int_l \frac{\bar{M}_2 M}{EI} dx .$$

Перемножение эпюр рекомендуется также выполнять по формуле трапеции.

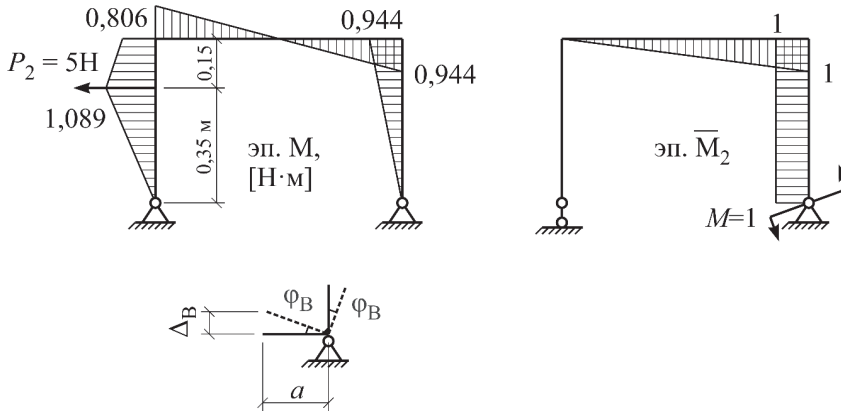


Рис. 2. Расчетная схема рамы

2. Описание лабораторной установки

Для опыта берется стальная рама прямоугольного поперечного сечения (рис. 3); L и H — пролет и высота рамы.

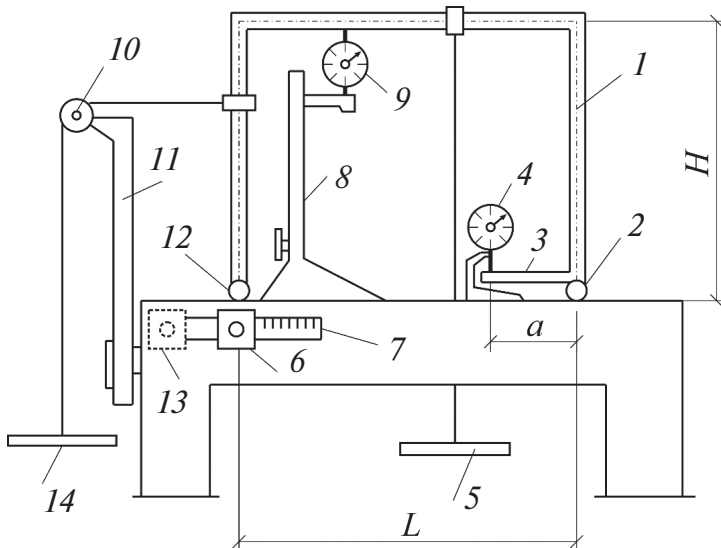


Рис. 3. Схема установки:

1 — рама; 2 — опорное устройство; 3 — консоль; 4 — индикатор; 5, 14 — подвески; 6 — подвижный груз; 7 — фиксирующий рычаг; 8 — выдвижная стойка; 9 — стрелочный индикатор; 10 — блок; 11 — стойка; 12 — опирание; 13 — левое положение груза

Опорное устройство 2 исключает возможность горизонтального перемещения, но не препятствует повороту опорного сечения (неподвижный шарнир). Опираение 12 предполагает как поворот, так и горизонтальное смещение. Ограничить или вовсе исключить горизонтальное перемещение опоры можно с помощью подвижного груза 6, установленного на фиксирующем рычаге 7. Для обеспечения статической неопределимости рамы (для исключения горизонтального перемещения опоры) груз необходимо сдвинуть в крайнее левое положение 13. Выдвижная стойка 8 служит для укрепления стрелочного индикатора 9.

Металлическая консоль 3 жестко скреплена с рамой в опорном сечении; установленный на ней индикатор 4 фиксирует вертикальное перемещение ее конца, что позволяет определить угол поворота опорного сечения. Подвески 5 и 14 служат для нагружения рамы. Скрепленная со станиной стойка 11 позволяет при помощи неподвижного блока 10 обеспечить горизонтальное приложение нагрузки.

Экспериментальное определение перемещений

Определение опытной величины прогиба Δ_D производится при помощи стрелочного индикатора 9 (цена деления 0,01 мм), установленного на ригеле в точке D .

Для определения опытной величины угла поворота используется стрелочный индикатор 4, установленный на консоли 3 (рис. 3). Зная показания индикатора Δ_B и длину консоли a (рис. 2), имеем

$$\operatorname{tg} \varphi_B = \frac{\Delta_B}{a}.$$

Ввиду того что угол φ_B очень мал (рассматриваются только упругие деформации), можно с достаточной степенью точности принять, что $\operatorname{tg} \varphi_B \approx \varphi_B$. В таком случае получим

$$\varphi_B = \frac{\Delta_B}{a}.$$

3. Порядок выполнения работы

Лабораторную работу следует выполнять в таком порядке:

- 1) перед выполнением работы необходимо проверить положение подвижного груза b (см. рис. 3). Он должен быть сдвинут влево до упора;
- 2) приложить к балке начальную вертикальную нагрузку $P_1 = 10$ Н и установить индикатор на ноль.

Примечание: первоначальная нагрузка необходима для устранения люфтов и зазоров в установке, что обеспечивает в дальнейшем более точное измерение деформаций;

- 3) сделать несколько измерений величин $\Delta_D = y_D$, последовательно увеличивая нагрузку равными ступенями $\Delta P_1 = 10$ Н. Данные опыта занести в табл. 1 (см. отчет на с. 69);
- 4) приложить горизонтальную начальную нагрузку $P_2 = 5$ Н. Сделать несколько измерений величин Δ_B , увеличивая каждый раз нагрузку на $\Delta P_2 = 5$ Н. Данные опыта занести в табл. 2 отчета;
- 5) определить опытный прогиб $y_{\text{оп}}$ как среднее арифметическое нескольких измерений;
- 6) найти опытный угол поворота $\varphi_{\text{оп}}$ опорного сечения, где Δ_B определяется как среднее арифметическое нескольких измерений;
- 7) определить теоретическое значение y_D для рамы, загруженной вертикальной нагрузкой $\Delta P_1 = 10$ Н;
- 8) определить теоретическое значение φ_B для той же рамы, загруженной горизонтальной нагрузкой $\Delta P_2 = 5$ Н;
- 9) после получения теоретических и опытных значений деформаций найти расхождение между ними в процентах

$$\delta_{\varphi} = \left| \frac{\varphi - \varphi_{\text{оп}}}{\varphi_{\text{оп}}} \right| \cdot 100 \%;$$

$$\delta_{y_D} = \left| \frac{y - y_{\text{оп}}}{y_{\text{оп}}} \right| \cdot 100 \%.$$

Результаты вычислений занести в табл. 3 отчета;

- 10) оформить отчет по прилагаемой форме.

4. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) краткое изложение теоретических основ;
- 3) описание лабораторной установки и назначение отдельных блоков;
- 4) теоретическое вычисление перемещений методом Мора;
- 5) таблицы с первичным экспериментальным материалом;
- 6) таблицу сравнения теоретических и опытных значений перемещений;
- 7) выводы по работе.

Перечень контрольных вопросов

1. Что такое прогиб и угол поворота поперечного сечения стержня?
2. Как определяются линейные и угловые перемещения в статически определимых системах методом Мора?
3. Какое правило знаков для перемещений принято в методе Мора?
4. Какие способы вычисления интеграла Мора вы знаете?
5. Как определяются линейные и угловые перемещения в статически неопределимых системах методом Мора?
6. Что такое основная система метода сил и как она выбирается?

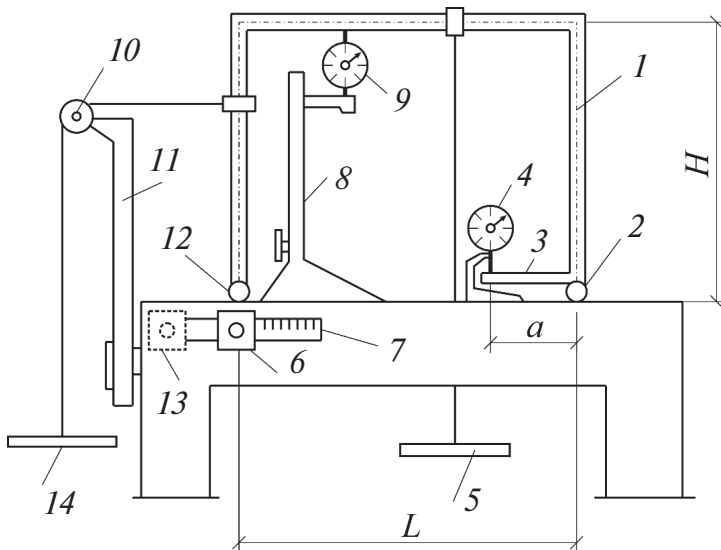
ОТЧЕТ О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ
Определение перемещений при изгибе статически неопределимой рамы

Цель работы: _____

Краткое изложение теоретических основ: _____

Измерительные приборы: _____

Схема лабораторной установки



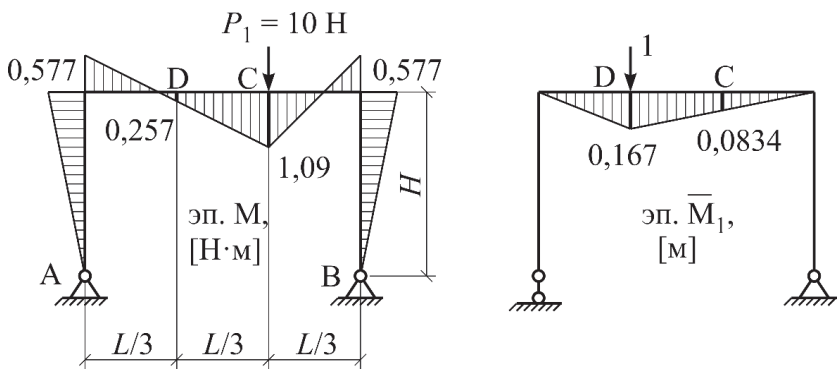
Размеры рамы и геометрические характеристики сечения

$L = 750 \text{ мм};$
 $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа};$
 $b = 50 \text{ мм};$

$H = 500 \text{ мм};$
 $a = 100 \text{ мм}.$
 $h = 7 \text{ мм};$

$I_z = \frac{h^3 b}{12} =$
 $\text{мм}^4.$

Схема нагружения рамы для определения перемещения



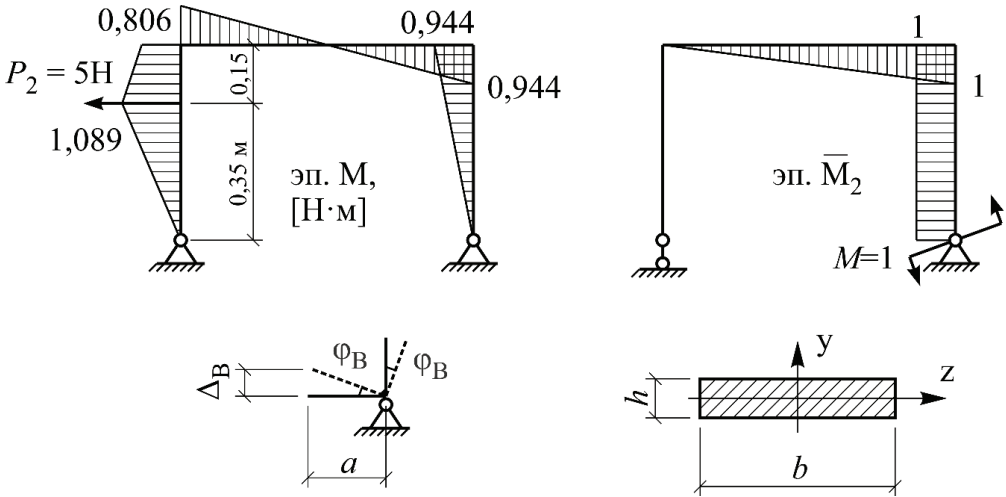
Теоретическое определение перемещения точки D

Опытное определение перемещения точки D

Таблица 1

Нагрузка P_1 , Н	Перемещение точки D		Прогиб $y_D = \Delta_D^{\text{cp}}$
	n	Δn	
10		—	
20			
30			
40			
Среднее приращение отсчетов	$\Delta_D^{\text{cp}} =$		

Схема нагружения рамы для определения угла поворота опорного сечения



Теоретическое определение угла поворота опорного сечения

Опытное определение угла поворота опорного сечения

Таблица 2

Нагрузка P_2 , Н	Перемещение точки B		Угол поворота $\Delta\varphi_B = \frac{\Delta_B^{\text{cp}}}{a}$
	n	Δn	
5		—	
10			
15			
20			
Среднее приращение отсчетов	$\Delta_B^{\text{cp}} =$		

Сравнение теоретических и опытных значений перемещений

Таблица 3

Перемещения	Опытные значения	Теоретические значения	Расхождение, %
Прогиб y_D			
Угол поворота φ_B			

Выводы по работе _____

Отчет принял

Лабораторная работа № 7

Исследование напряжений в стержне большой кривизны

Основным исследуемым элементом лабораторной установки является плоский стержень (брус) большой кривизны прямоугольного поперечного сечения (рис. 1). Материал стержня — сталь марки 45. Стержень должен быть неподвижно закреплен на опорной плите лабораторного стенда.

Цель работы — экспериментально определить напряжения, возникающие в кривом стержне при его внецентренном растяжении.

Внецентренное растяжение — это такой вид сложного сопротивления, при котором точка приложения продольной силы не совпадает с центром тяжести.

1. Краткие теоретические сведения

Принято различать стержень малой и большой кривизны. Главным признаком для такого деления является отношение радиуса кривизны центрального слоя ρ (центральный слой кривого стержня образует центры тяжести его поперечных сечений) к высоте сечения h в плоскости кривизны (рис. 1): при $\frac{\rho}{h} > 5$ стержень малой кривизны;

при $\frac{\rho}{h} < 5$ стержень большой кривизны.

В результате воздействия на кривой стержень внецентренно приложенной силы P в поперечном сечении $I-I$ возникают продольная сила $N = P$ и изгибающий момент $M_{изг} = P\rho$. При изгибе стержня так-

же появляется напряжение σ , которое распределяется по высоте поперечного сечения нелинейно. При внецентренном растяжении нормальные напряжения в каждой точке поперечного сечения стержня прямо пропорциональны расстоянию от этой точки до нейтральной оси. **Нейтральной осью (нулевой линией)** называется местоположение точек, в которых нормальные напряжения равны нулю. Нейтральная ось кривого стержня не проходит через центр тяжести поперечного сечения. Она всегда расположена ближе к центру кривизны, чем центр тяжести поперечного сечения. Нейтральный слой имеет радиус кривизны r_0 , который меньше радиуса центрального слоя ρ на значение величины e (эксцентриситет нейтральной оси).

Наибольшие напряжения (при растяжении) возникают в точках сечения, наиболее удаленных от нейтрального слоя и расположенных на внутренней поверхности кривого бруса.

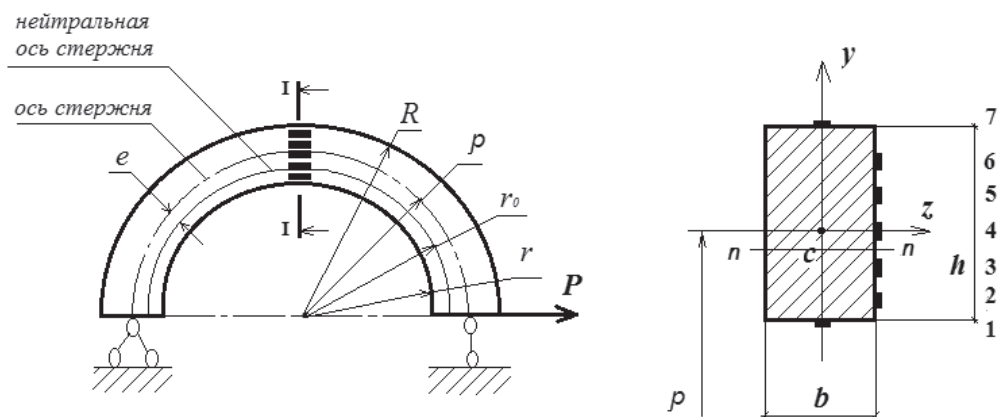


Рис. 1. Вид стержня большой кривизны прямоугольного поперечного сечения: h — высота сечения $I-I$; b — ширина сечения $I-I$; r — внутренний радиус; r_0 — радиус кривизны нейтрального слоя при действии $M_{\text{изг}}$ ($N = 0$); ρ — радиус кривизны центрального слоя; R — внешний радиус; e — расстояние между центральным и нейтральным слоями

Внецентренное растяжение бруса большой кривизны представляет собой совокупность осевого растяжения и изгиба. Следовательно, нормальное напряжение σ в среднем поперечном сечении $I-I$ определяется как сумма напряжений от продольной силы N и изгибающего момента $M_{\text{изг}}$

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_{\text{изг}},$$

где σ_N — напряжение от продольной силы N ; $\sigma_{изг}$ — напряжение от изгибающего момента $M_{изг}$.

Продольная сила N , приложенная в центре тяжести поперечного сечения стержня большой кривизны, вызывает во всех точках сечения одинаковые нормальные напряжения

$$\sigma_N = \frac{N}{A},$$

где A — площадь поперечного сечения стержня $I-I$.

При действии изгибающего момента $M_{изг}$ возникают напряжения, определяемые по следующей формуле:

$$\sigma_{изг} = \frac{M_{изг}(a^i - r_0)}{Aea^i},$$

где a^i — расстояние до i -го тензорезистора от центра кривизны бруса.

Следует иметь в виду, что в этой формуле r_0 — радиус кривизны слоя, который был бы нейтральным при действии только момента $M_{изг}$ (при $N = 0$) — слой $n-n$ (рис. 1); при действии еще и продольной силы этот слой не является нейтральным

$$r_0 = \frac{h}{\ln(R/r)}.$$

Таким образом, теоретическое значение нормального напряжения σ в среднем поперечном сечении $I-I$ определяется по формуле

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M_{изг}(a^i - r_0)}{Aea^i}. \quad (1)$$

Знак напряжения σ_N от действия продольной силы N совпадает со знаком продольной силы, а знак напряжения $\sigma_{изг}$ от действия изгибающего момента $M_{изг}$ устанавливается в зависимости от направления изгибающего момента (определяется по построенным эпюрам).

2. Описание лабораторной установки

Внешний вид комплекса приведен на рис. 2. Комплекс представляет собой лабораторный стол с соответствующей наладкой (рис. 3), хранимой в одном из трех ящиков и устанавливаемой на столе при проведении лабораторной работы. Стол состоит из каркаса 7, встроенной установочной плиты 4 сварной конструкции с Т-образным пазом на верхней плоскости для закрепления элементов наладки 3, набора выдвижных ящиков 5 для хранения этих элементов, роликов (колес) 6 для удобства передвижения стола в пределах лаборатории и четырех опор 8 для установки стола по уровню перед проведением лабораторных работ. На столе находится измеритель деформации (ИД) 1 тензометрический цифровой ИДТЦ-01 (см. прил. 1) и блок измерения усилий (БИУ) 2 (см. прил. 2). При проведении лабораторных работ ИД и БИУ подключаются к источнику питания согласно паспортам.

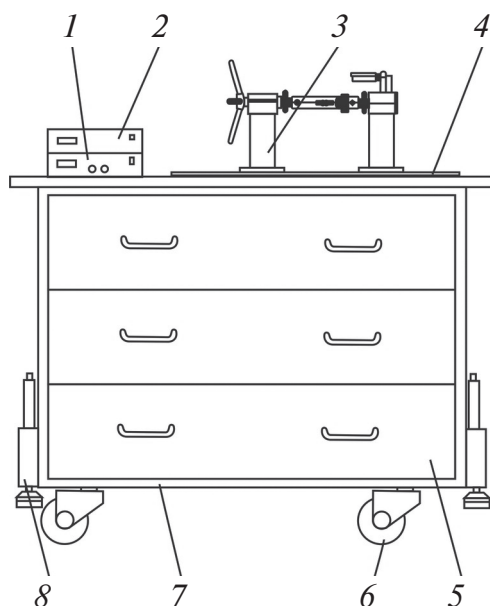


Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки

Наладка, используемая в данной лабораторной работе, показана на рис. 3. На плите стола 1 установлены две опорные стойки 7 и 14, которые закреплены к плите стола болтовыми соединениями — бол-

том 2, гайкой 3, шайбой 4. Головки болтов 2 заведены в паз плиты стола 1. В отверстие левой опорной стойки 7 вставлена неподвижная шарнирная ось 8, которая закреплена центральным болтом 6 рукоятки 5.

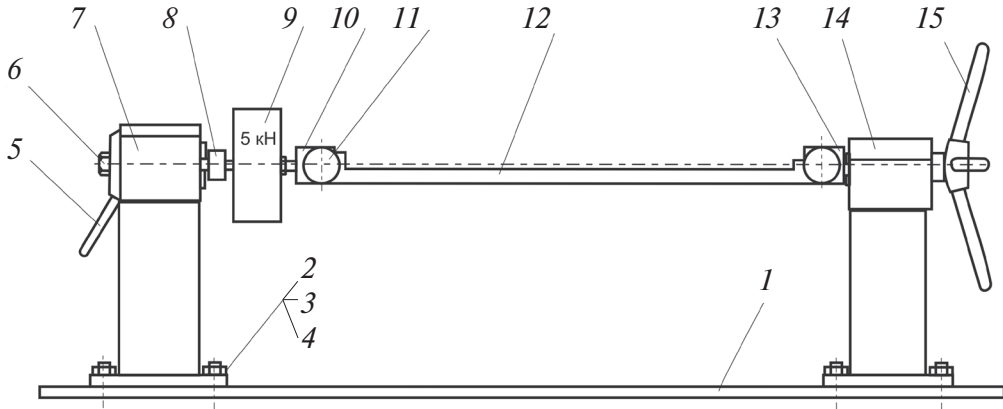


Рис. 3. Наладка:

1 — стол; 2 — болт; 3 — гайка; 4 — шайба; 5 — рукоятка; 6 — болт; 7, 14 — опорная стойка; 8 — ось; 9 — датчик усилий; 10 — вилка; 11 — штифты; 12 — образец; 13 — шарнирная ось; 15 — штурвал

К шарнирной оси 8 прикреплен датчик усилий до 5 кН 9, а к нему вилка 10. В отверстие стойки 14 вставлена подвижная шарнирная ось 13, перемещение которой вдоль оси создается штурвалом 15. Между вилкой 10 и подвижной шарнирной осью 13 установлен образец 12 (стержень большой кривизны). Он зафиксирован специальными штифтами 11. Нагружение образца производится вращением штурвала 15. Растягивающую силу контролируют по показаниям БИУ.

Технические характеристики исследуемого кривого стержня:

высота h , мм	$60 \pm 2,0$
ширина b , мм	$10 \pm 0,2$
внутренний радиус r , мм	$40 \pm 2,0$
внешний радиус R , мм	$100 \pm 2,0$
эксцентриситет нейтральной оси e	4,58
нагружающая сила P , кН, не более	4

3. Порядок выполнения работы

Порядок выполнения работы следующий:

- 1) установите стержень, зафиксируйте его штифтами и произведите предварительное нагружение для устранения зазоров в шарнирах силой 0,5 кН. Снимите показания ИД для всех семи тензорезисторов;
- 2) нагружайте образец последовательно силой 1,5; 2,5; 3,5 кН, контролируя значение силы по табло БИУ. На каждом уровне силы снимайте показания ИД для всех тензорезисторов и заносите в таблицу наблюдений;
- 3) подсчитайте среднюю разность Δn показаний всех тензорезисторов для ступени нагрузки $\Delta P = 1$ кН;
- 4) определите экспериментально полученные значения напряжений во всех точках для ступени $\Delta P = 1$ кН по формуле

$$\sigma_{\text{оп}} = K_{\epsilon} \Delta n E,$$

где K_{ϵ} — цена единицы дискретности ИД при измерениях деформации; E — модуль нормальной упругости материала образца (модуль Юнга), $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа;

- 5) подсчитайте по формуле (1) теоретические значения напряжений во всех точках при нагрузке в 1 кН и постройте график распределения напряжений по сечению;
- 6) дайте заключение об особенностях напряженного состояния в кривом стержне. Оцените соответствие теоретических и опытных результатов

$$\delta = \frac{\sigma - \sigma_{\text{оп}}}{\sigma} \cdot 100 \, \%.$$

4. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) краткое изложение теоретических основ;
- 3) схему образца лабораторной установки;
- 4) таблицу с первичным экспериментальным материалом;
- 5) среднюю разность показаний всех тензорезисторов для ступени нагрузки $\Delta P = 1$ кН и приращение напряжений во всех точках для этой ступени;
- 6) теоретические значения напряжений во всех точках при нагрузке в 1 кН;
- 7) график распределения напряжений по сечению;
- 8) оценку соответствия теоретических и опытных результатов;
- 9) выводы по работе.

Перечень контрольных вопросов

1. Какой признак служит для различения стержней большой и малой кривизны?
2. Что характерно для стержня большой и малой кривизны?
3. Как распределяются нормальные напряжения при изгибе в стержнях большой кривизны?
4. Где возникают наибольшие напряжения при растяжении?
5. Что такое центральная линия?
6. Что характерно для нейтральной линии?
7. Чем определяются напряжения в среднем сечении $I-I$?

ОТЧЕТ О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Исследование напряжений в стержне большой кривизны

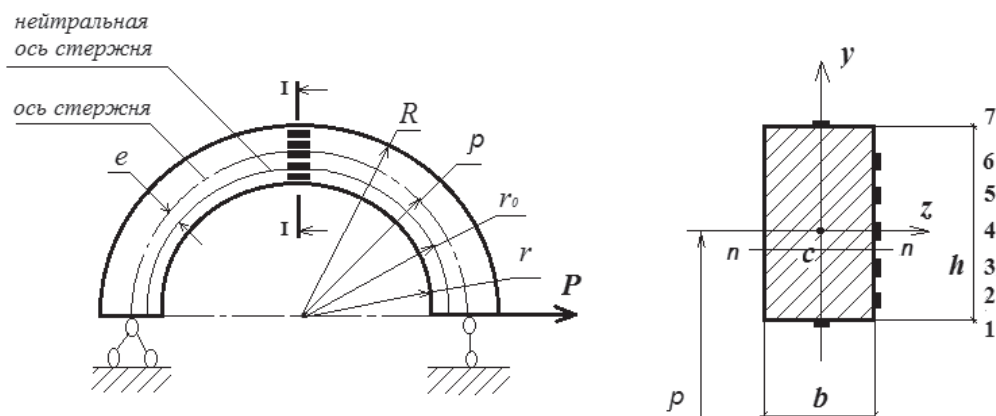
Цель работы: _____

Краткое изложение теоретических основ: _____

Измерительные приборы: _____

Цена единицы дискретности ИД при измерениях деформации $K_\epsilon =$,
модуль Юнга $E =$ МПа.

Схема образца в лабораторной установке



Данные о стержне:

$h =$ мм;

$b =$ мм;

$r =$ мм;

$R =$ мм;

$e =$;

$r_0 = \frac{h}{\ln(R/r)} =$ мм;

расстояние между тензорезисторами мм.

Таблица наблюдений

Нагрузка, кН (показания БИУ)	Показания n_i ИД, мкОм/кОм (для i -го тензорезистора)						
	1	2	3	4	5	6	7
0,5							
1,5							
2,5							
3,5							

Средняя разность Δn_i^{cp} показаний ИД на i -м тензорезисторе для ступени нагрузки $\Delta P = 1$ кН

$$\Delta n_i^{\text{cp}} = \frac{\sum_{j=1}^3 (n_i^{j+1} - n_i^j)}{3},$$

где n_i^j — показание ИД на i -м тензорезисторе при j -м нагружении;
 $i = 1, \dots, 7; j = 1, \dots, 3$.

$\Delta n_1^{\text{cp}} =$ мкОм/кОм;

$\Delta n_2^{\text{cp}} =$ мкОм/кОм;

$\Delta n_3^{\text{cp}} =$ мкОм/кОм;

$\Delta n_4^{\text{cp}} =$ мкОм/кОм;

$$\begin{aligned}\Delta n_5^{\text{cp}} &= && \text{мкОм/кОм;} \\ \Delta n_6^{\text{cp}} &= && \text{мкОм/кОм;} \\ \Delta n_7^{\text{cp}} &= && \text{мкОм/кОм.}\end{aligned}$$

Опытные значения нормальных напряжений около каждого тензорезистора для ступени $\Delta P = 1$ кН:

$$\sigma_i = K_\varepsilon \Delta n_i^{\text{cp}} E ,$$

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= && \text{МПа,} \\ \sigma_2 &= && \text{МПа;} \\ \sigma_3 &= && \text{МПа;} \\ \sigma_4 &= && \text{МПа;} \\ \sigma_5 &= && \text{МПа;} \\ \sigma_6 &= && \text{МПа;} \\ \sigma_7 &= && \text{МПа.}\end{aligned}$$

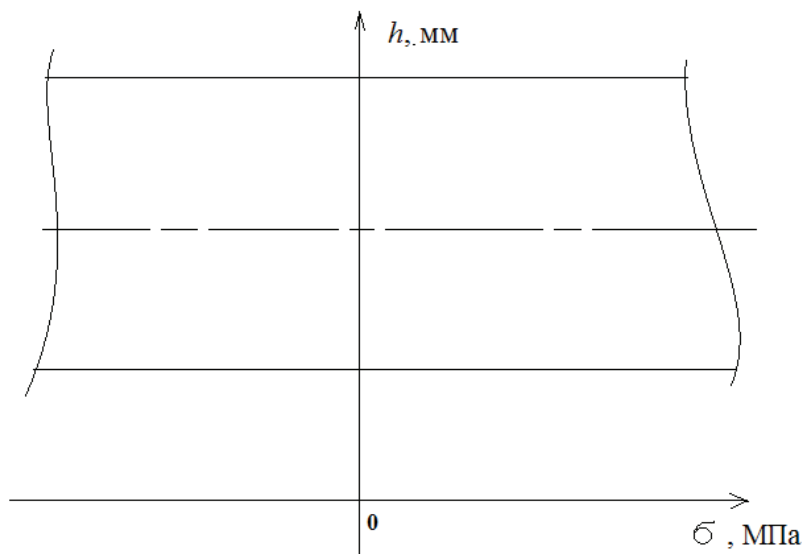
Теоретические значения нормальных напряжений в выбранных точках при нагрузке в 1 кН

$$\sigma_i^T = \frac{N}{A} \pm \frac{M_{\text{изг}}(a^i - r_0)}{Aea^i},$$

где продольная сила $N = P =$ кН; площадь поперечного сечения стержня $A = b h =$ мм²; изгибающий момент $M_{\text{изг}} = P \rho =$ кН·м; a^i — расстояние до i -го тензорезистора.

$$\begin{aligned}\sigma_1^T &= && \text{МПа;} \\ \sigma_2^T &= && \text{МПа;} \\ \sigma_3^T &= && \text{МПа;} \\ \sigma_4^T &= && \text{МПа;} \\ \sigma_5^T &= && \text{МПа;} \\ \sigma_6^T &= && \text{МПа;} \\ \sigma_7^T &= && \text{МПа.}\end{aligned}$$

График распределения нормального напряжения по сечению



Оценка соответствия теоретических и опытных результатов:

$$\delta_i = \frac{\sigma_i'' - \sigma_i}{\sigma_i''} \cdot 100 \%,$$

$$\delta_1 = \quad \%;$$

$$\delta_2 = \quad \%;$$

$$\delta_3 = \quad \%;$$

$$\delta_4 = \quad \%;$$

$$\delta_5 = \quad \%;$$

$$\delta_6 = \quad \%;$$

$$\delta_7 = \quad \%.$$

Выводы по работе

Отчет принял

Лабораторная работа № 8

Определение напряжений и перемещений в круговой арке при изгибе

В данной работе рассматривается круговая арка (рис. 1).

Цель работы — экспериментально проверить расчетные формулы для определения горизонтального перемещения опорного сечения и напряжения в замке круговой арки.

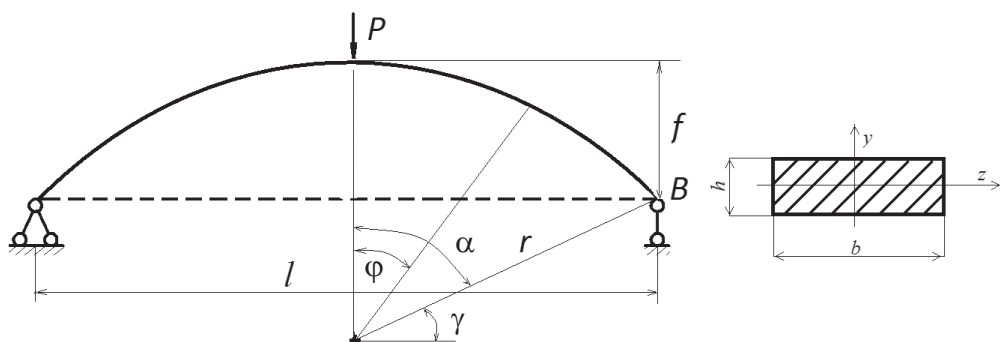


Рис. 1. Круговая арка

1. Краткие теоретические сведения

Аркой называется распорная система, имеющая вид кривого бруса. **Распор** — это проекция опорной реакции арки на прямую, соединяющую опорную точку со смежной опорной точкой. Рассмотрим круговую арку (рис. 1), которая закреплена на двух шарнирных опорах и нагружена сосредоточенной силой P , приложенной к середине пролета (к замку арки). Такая двухшарнирная арка подвергается изгибу. Поперечное сечение рассматриваемой арки имеет форму прямоугольника.

Определим радиус r арки. Из данных рис. 1 следует, что

$$\sin \alpha = \frac{l}{2r}, \quad \cos \alpha = \frac{r-f}{r}.$$

Из тригонометрической формулы

$$\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = \left(\frac{l}{2r} \right)^2 + \left(\frac{r-f}{r} \right)^2 = 1$$

получаем

$$r = \frac{l^2 + 4f^2}{8f}.$$

Остановимся на определении горизонтального перемещения правого опорного сечения (точки B) арки. Его вычисляют с помощью интеграла Мора

$$\Delta_{\text{гор}} = \int_0^l \frac{M_1 M_p}{EI_z} dx,$$

где M_1 и M_p — значения эпюр изгибающих моментов от единичной горизонтальной силы, приложенной к опоре B , и от внешней нагрузки P ; E — модуль Юнга; I_z — осевой момент инерции сечения относительно Z ,

$$I_z = \frac{bh^3}{12}.$$

Изгибающий момент M_1 вычисляется по формуле

$$M_1 = 1r(\cos \varphi - \cos \alpha),$$

а момент M_p — по формуле

$$M_p = \frac{P}{2}r(\sin \alpha - \sin \varphi).$$

Следовательно, горизонтальное перемещение правого опорного сечения в системе координат r и φ определяется по интегралу

$$\Delta_{\text{гор}} = \int_{\gamma}^{\pi/2} \frac{r(\cos \varphi - \cos \alpha)(P \cdot r/2)(\sin \alpha - \sin \varphi)}{EI_z} r d\varphi ,$$

где $\gamma = \pi / 2 - \alpha$.

Вычисление этого интеграла приводит к выражению

$$\Delta_{\text{гор}} = 0,48 \frac{Pr^3}{2EI_z} .$$

Здесь нужно ввести поправочный коэффициент, учитывающий разнотолщинность арки, тогда теоретическая величина перемещения $\Delta_{\text{гор}}$ равна

$$\Delta_{\text{гор}} = 0,48 \frac{Pr^3}{2EI_z} k , \quad (1)$$

где k — поправочный коэффициент, который в нашем случае принят равным 0,208.

Обратимся к вопросу определения нормальных напряжений в арке. Ввиду того что арка имеет малую толщину ($h = 0,5$ см), напряжения в ней можно рассчитывать, как в балке. Теоретическое значение нормального напряжения σ находится по формуле

$$\sigma = \frac{M_p}{I_z} y_{\text{max}} , \quad (2)$$

где y_{max} — расстояние от нейтральной оси Z до точки, в которой определяется напряжение.

В данной лабораторной работе груз приложен к замку арки, поэтому $\varphi = 0$. Значит, изгибающий момент M_p равен

$$M_p = \frac{P}{2} r \sin \alpha .$$

2. Определение перемещений и напряжений на лабораторной установке

Опытная величина перемещения $\Delta_{\text{гор}}$ правого опорного сечения B вычисляется на основании данных индикатора с ценой деления 0,01 мм/дел по формуле

$$\Delta_{\text{гор}}^B = 0,01 \Delta n^{\text{cp}}, \quad (3)$$

где Δn^{cp} — это средняя разность показаний индикатора.

Опытная величина напряжений $\sigma^{\text{оп}}$ в месте приложения груза находится по формуле по данным тензометра с ценой деления K_{σ}

$$\sigma^{\text{оп}} = K_{\sigma} \Delta n^{\text{cp}}, \quad (4)$$

где Δn^{cp} — это средняя разность показаний тензометра.

3. Порядок выполнения работы

Лабораторную работу выполняют в следующем порядке:

- 1) вычислить осевой момент инерции сечения арки относительно Z

$$I_z = \frac{bh^3}{12};$$

- 2) снять начальные показания тензометра и индикатора при нулевой нагрузке $P_1 = 0$ Н;
- 3) последовательно увеличивая нагрузку P ступенями ΔP , равными 5 или 10 Н, найти приращения показаний Δn_j как разницу между последующими и предыдущими показаниями приборов

$$\Delta n_j = n_j - n_{j-1},$$

где $j = 2, 3$.

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу (см. форму отчета на с. 90);

- 4) вычислить опытную величину перемещений $\Delta_{\text{гор}}$ и напряжений $\sigma^{\text{оп}}$ по формулам (3) и (4) соответственно;
- 5) определить теоретические значения величин: перемещения $\Delta_{\text{гор}}$ и напряжения σ по формулам (1) и (2) соответственно;
- 6) найти расхождение между теоретическими и опытными значениями перемещений и напряжений

$$\delta = \frac{\Delta_{\text{гор}} - \Delta_{\text{гор}}^B}{\Delta_{\text{гор}}} \cdot 100 \%,$$

$$\delta = \frac{\sigma - \sigma^{\text{оп}}}{\sigma} \cdot 100 \%.$$

4. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) краткое изложение теоретических вопросов;
- 3) описание лабораторной установки и назначение отдельных блоков;
- 4) таблицу с первичным экспериментальным материалом;
- 5) опытные значения величин перемещений и напряжений;
- 6) теоретические значения величин перемещений и напряжений;
- 7) выводы по работе.

Перечень контрольных вопросов

1. Дайте определение арки.
2. Что понимается под выражением «замок арки»?
3. В каком месте арки прикладывается внешняя сила?
4. По какой формуле вычисляется радиус арки?
5. Какое перемещение опоры определяется?
6. В каком месте арки определяется напряжение?
7. Что такое распор арки?

ОТЧЕТ О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ **Определение напряжений и перемещений в круговой арке при изгибе**

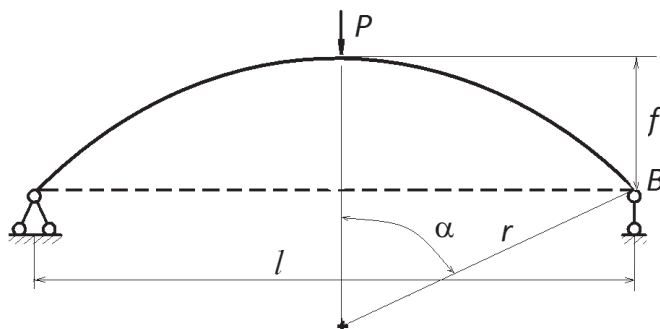
Цель работы: _____

Краткое изложение теоретических основ: _____

Измерительные приборы: _____

Цена единицы дискретности тензометра $K_\sigma =$ _____ Па.

Схема нагружения арки



$l = 76$ см;

$f = 19$ см;

$r =$ _____ см;

угол $\alpha =$ _____ °.

Степень нагрузки $\Delta P =$ _____ Н (5 или 10),

модуль Юнга $E = 70$ ГПа.

Геометрические характеристики прямоугольного сечения арки:

$$b = 50 \text{ мм}; h = 5 \text{ мм};$$

$$I_z = \frac{bh^3}{12} = \quad \text{мм}^4.$$

Таблица наблюдений

$P_i, \text{ Н}$	Показания индикатора		Показания тензометра	
	n_i	Δn_j	n_i	Δn_j
0		—		—
$\Delta P =$	$\Delta n^{\text{cp}} =$		$\Delta n^{\text{cp}} =$	

Средняя разность Δn^{cp} показаний индикатора и тензометра

$$\Delta n^{\text{cp}} = \frac{\sum_{j=2}^3 (n_j - n_{j-1})}{2}.$$

Значение перемещения $\Delta_{\text{гор}}^B$, определенное из опытных данных,

$$\Delta_{\text{гор}}^B = 0,01 \cdot \Delta n^{\text{cp}} = \quad \text{мм}.$$

Теоретическая величина перемещения $\Delta_{\text{гор}}$

$$\Delta_{\text{гор}} = 0,48 \frac{\Delta P r^3}{2EI_z} k = \quad \text{мм}.$$

Значение напряжения $\sigma^{\text{оп}}$, полученное из опыта,

$$\sigma^{\text{оп}} = K_{\sigma} \cdot \Delta n^{\text{cp}} = \quad \text{Па}.$$

Теоретическая величина напряжения σ

$$\sigma = \frac{M_p}{I_z} y_{\max} = \quad = \quad \text{Па};$$

$$M_p = \frac{\Delta P}{2} r \sin \alpha = \quad = \quad \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Оценка соответствия теоретических и опытных результатов:

$$\delta = \frac{\Delta_{\text{гор}} - \Delta_{\text{гор}}^B}{\Delta_{\text{гор}}} \cdot 100 \% = \quad \%;$$

$$\delta = \frac{\sigma - \sigma^{\text{оп}}}{\sigma} \cdot 100 \% = \quad \%.$$

Выводы по работе _____

Отчет принял

Лабораторная работа № 9

Исследование работы стержня при продольно-поперечном изгибе

В данной работе исследуется поведение стального шарнирно опертого гибкого стержня при продольно-поперечном изгибе.

Цель работы — экспериментально определить косвенным путем (по методу Саусвелла) значения силы критической нагрузки сжатого стержня и сравнить ее с теоретическим значением.

1. Краткие теоретические сведения

Продольно-поперечным изгибом называется сочетание поперечного изгиба со сжатием или растяжением стержня. При расчете на продольно-поперечный изгиб вычисление изгибающих моментов в поперечном сечении стержня производится с учетом прогибов его оси. При этом прогибы стержня, а также внутренние усилия и напряжения зависят как от поперечной, так и от продольной сил.

В практике инженерных расчетов под продольно-поперечным изгибом подразумевают обычно случай действия сжимающей силы F и поперечной нагрузки Q (рис. 1).

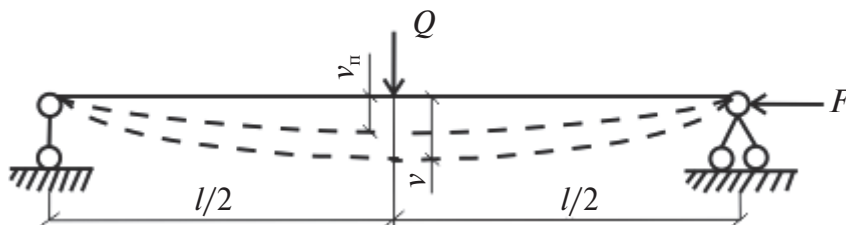


Рис. 1. Вид шарнирно опертого гибкого стержня

Для решения задачи о продольно-поперечном изгибе стержня (балки) необходимо составлять и решать дифференциальное уравнение второго порядка

$$-EJ_x \frac{d^2 v}{dz^2} = M_x,$$

где E — модуль продольной упругости материала балки; J_x — осевой момент инерции относительно нейтральной оси x ; v — полный прогиб; M_x — изгибающий момент в сечении.

Это само по себе может оказаться непростой задачей. Задача значительно усложняется, если стержень имеет несколько участков, так как для каждого участка придется составлять и решать свое дифференциальное уравнение. Поэтому, как правило, в расчетах при определении полного прогиба v в таких балках применяют приближенную формулу

$$v = \frac{v_n}{\left(1 - \frac{F}{F_\text{э}}\right)},$$

где v_n — прогиб от поперечной силы, т. е. без учета продольной силы; F — продольная сила; $F_\text{э}$ — Эйлера сила, вычисляемая по формуле

$$F_\text{э} = \frac{\pi^2 EJ_x}{(\mu l)^2}.$$

Здесь μ — коэффициент приведения длины.

Заметим, что формула эйлеровой силы напоминает формулу Эйлера для критической нагрузки $F_\text{кр}$ с тем отличием, что в числитель входит момент инерции J_x относительно оси x , а необязательно J_min (минимальный осевой момент инерции поперечного сечения стержня). Только в том случае, когда $J_x = J_\text{min}$ и гибкость стержня λ больше предельной гибкости $\lambda_\text{кр}$

$$\lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}} > \lambda_{\text{кр}} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{\text{пц}}}}, \quad (2)$$

эйлерова и критическая силы совпадают. В формуле (2) i_{\min} — это минимальный радиус инерции сечения стержня, $i_{\min} = \sqrt{\frac{J_{\min}}{A}}$; $\sigma_{\text{пц}}$ — предел пропорциональности материала.

Приближенной формулой (1) нельзя пользоваться при сжимающей силе F , близкой к F_3 , так как при этом прогибы будут очень большими, а в пределе (при $F \rightarrow F_3$) стремятся к бесконечности. Решение дифференциального уравнения в этом случае также приводит к неправильным результатам, поскольку при его выводе используется приближенное выражение кривизны. Однако достаточно достоверные результаты (прогибы) получаются в обоих способах, когда сжимающая сила F находится в интервале $0 < F < (0,7 \dots 0,8) F_3$.

Из уравнения (1) следует, что кривая v как функция F является гиперболой, у которой $v = v_{\text{п}}$ при $F = 0$, и прямая $F = F_3$ ($v \rightarrow \infty$) является асимптотой.

При исследовании прогиба среднего сечения v шарнирно опертой балки, нагруженной увеличивающейся продольной силой F и постоянной поперечной силой Q в середине пролета, имеем

$$v_{\text{п}} = \frac{Ql^3}{48EJ_{\min}}, \quad (3)$$

$$F_3 = F_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 EJ_{\min}}{l^2},$$

так как $J_x = J_{\min}$, $\mu = 1$ и $\lambda > \lambda_{\text{кр}}$.

Дополнительные прогибы, вызванные действием продольной силы F , приближенно определяются по формуле

$$\Delta v = \frac{v_{\text{п}}}{\left(\frac{F_3}{F - 1} \right)}, \quad (4)$$

где $v_{\text{п}}$ — первоначальный прогиб от силы Q .

2. Описание лабораторной установки

Внешний вид комплекса приведен на рис. 2. Комплекс представляет собой лабораторный стол с соответствующей наладкой (рис. 3), хранимой в одном из трех ящиков и устанавливаемой на столе при проведении лабораторной работы. Стол состоит из каркаса 7, встроенной установочной плиты 4 сварной конструкции с Т-образным пазом на верхней плоскости для закрепления элементов наладки 3, набора выдвижных ящиков 5 для хранения этих элементов, роликов (колес) 6 для удобства передвижения стола в пределах лаборатории и четырех опор 8 для установки стола по уровню перед проведением лабораторных работ. На столе находится измеритель деформации (ИД) 1 тензометрический цифровой ИДТЦ-01 (см. прил. 1) и блок измерения усилий (БИУ) 2 (см. прил. 2). При проведении лабораторных работ ИД и БИУ подключаются к источнику питания согласно паспортам.

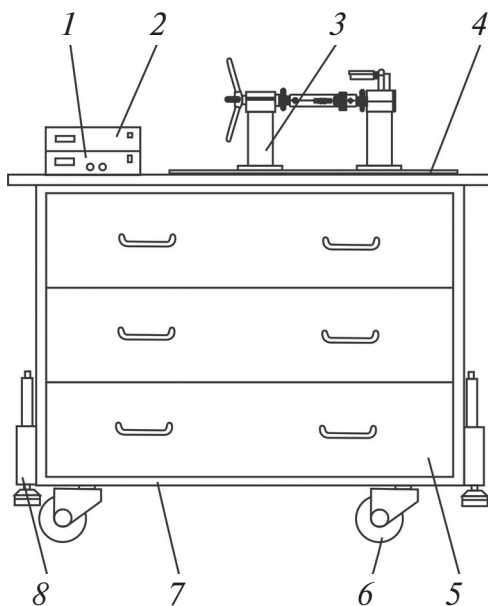


Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки

Наладка, используемая в данной лабораторной работе, показана на рис. 3. Установите на стол опорную стойку 1 и, вставив в ее отверстие вилку 24, втяните до конца при помощи штурвала 2. Заверните

втулку на ось датчика усилий до $0,5 \text{ кН}$ 23 и, вставив их в паз вилки 24, подвиньте вдоль оси так, чтобы втулка вошла в отверстие вилки. Возьмите опорную стойку 15. Вставьте осевой конец подшипникового узла образца 16 — балки в сборе с ползуном 21 и закрепите центральным болтом 14 рукояти 13. Придвигая опору 1 к опоре 15, вставьте ползун 21 внутрь вилки 24 и закрепите собранную наладку на плите стола 6 болтовыми соединениями: болтом 3, гайкой 5, шайбой 4. Закрепите на плите стола 6 высокую индикаторную стойку 20 болтовым соединением. Предварительно закрепите на стойке 20 две бобышки 7, одну выше, другую ниже образца 16. Вставьте в отверстие нижней бобышки 7 стержень 8, а в отверстие стержня — кронштейн 10 с закрепленной на ней индикаторной головкой 12. Выставьте систему так, чтобы ножка индикаторной головки опиралась на образец 16 по оси на середине длины, и зафиксируйте. Сжимайте балку, вращая штурвал 2. Контролируйте усилие по показаниям блока измерения усилий. При необходимости вставьте в отверстие верхней бобышки 7 кронштейн 19. Отрегулируйте кронштейн 19 по высоте так, чтобы концы винтов 17, 18 на них были на уровне оси балки.

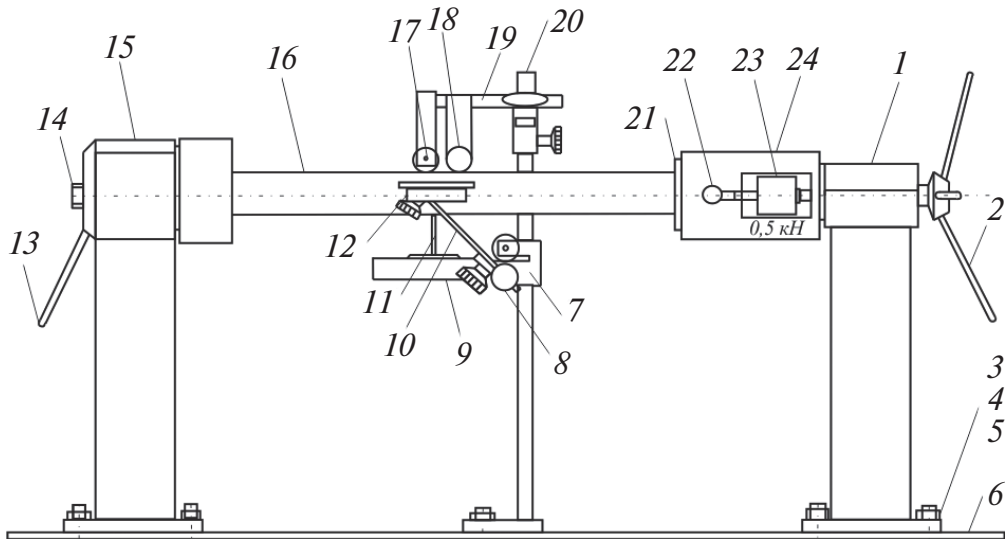


Рис. 3. Наладка:

1 — опорная стойка; 2 — штурвал; 3 — болт; 4 — шайба; 5 — гайка; 6 — плита стола; 7 — бобышка; 8 — стержень; 9 — груз; 10 — кронштейн; 11 — подвес; 12 — индикаторная головка; 13 — рукоять; 14 — центральный болт; 15 — опорная стойка; 16 — образец; 17 — винт; 18 — винт; 19 — кронштейн; 20 — стойка; 21 — ползун; 22 — винт; 23 — датчик усилий; 24 — вилка

Для нагружения балки 16 поперечной нагрузкой на середине длины вверните винт 17 на подвижной половине кронштейна 19 до упора в балку и повесьте на специально предусмотренную ось подвес 11 с грузом 10 Н 9. При необходимости создания дополнительной опоры в центре балки заверните винты 17, 18 на неподвижной половине кронштейна с обеих сторон балки. Для реализации различных видов закрепления балки 16 служат винты 22.

Для изучения потери устойчивости при сжатии используется гибкий стержень прямоугольного сечения с параметрами:

длина рабочей части, мм.....	450±2,0
высота сечения, мм.....	2±0,2
ширина сечения, мм.....	35±1,0
нагружаемая сила, кН, не более.....	1

3. Порядок выполнения работы

Лабораторную работу выполняют в следующем порядке:

- 1) соберите наладку согласно рис. 3 и отверните винты 18 на концах балки (шарнирное закрепление обоих концов $\mu = 1$);
- 2) заверните болт 17 на подвижной части кронштейна 19 до соприкосновения с балкой и повесьте на ось подвижной части подвеску без груза;
- 3) снимите показание n_0 индикатора 12;
- 4) нагрузите балку поперечной силой $Q = 10$ Н и снимите показание n_1 индикатора 12 для определения прогиба балки;
- 5) нагружайте последовательно балку сжимающей продольной силой F до 30, 100, 150, 200, 250 Н, контролируя значение силы по БИУ. На каждом уровне снимайте показания индикатора n_i ;
- 6) медленно разгрузите стержень от сжимающих усилий и снимите подвеску с грузом, стержень при этом должен вернуться в исходное состояние;
- 7) определите прогиб балки от поперечной силы Q как разность показаний индикатора $v_n = (n_1 - n_0)$;

- 8) определите прогибы балки $\Delta v_i = (n_i - n_1)$ от действия продольной силы F ;
- 9) вычислите полные прогибы балки от совместного действия продольной и поперечной нагрузок $v_i = (n_i - n_0)$;
- 10) вычислите теоретические значения прогибов от действия поперечной силы и продольных нагрузок по формулам (1), (3), (4);
- 11) сравните между собой теоретические и экспериментальные значения прогибов. Оцените соответствие теоретических и опытных результатов

$$\delta = \frac{v - v_{\text{оп}}}{v} \cdot 100 \%;$$

- 12) постройте график теоретических значений в координатах $F(v)$ и отметьте на нем экспериментальные значения;
- 13) сравните теоретическое значение критической силы, вычисленной по формуле Эйлера с экспериментальным;
- 14) сделайте вывод о практической целесообразности применения метода Саусвелла для определения критических нагрузок сжатых стержней.

4. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) краткое изложение теоретических основ;
- 3) описание лабораторной установки и назначение отдельных блоков;
- 4) таблицу с первичным экспериментальным материалом;
- 5) вычисленные экспериментальные и теоретические значения прогибов балки от продольной и поперечной нагрузок. Их сравнение;
- 6) график теоретических и экспериментальных значений прогибов;
- 7) выводы по работе.

Перечень контрольных вопросов

1. Что такое продольно-поперечный изгиб?
2. В чем состоят основные отличия продольно-поперечного изгиба от других случаев изгиба?
3. В чем заключается метод Саусвелла?
4. Запишите приближенные формулы, используемые при определении прогибов.
5. В чем отличие критической силы от эйлеровой?
6. Что входит в формулу эйлеровой силы?

ОТЧЕТ О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

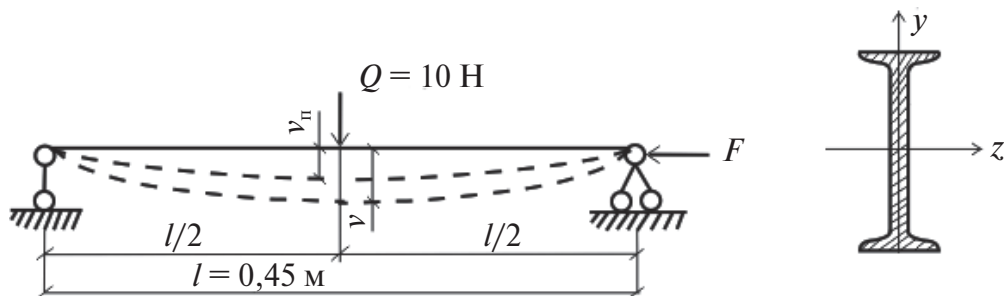
Исследование работы стержня при продольно-поперечном изгибе

Цель работы: _____

Краткое изложение теоретических основ: _____

Измерительные приборы: _____

Схема образца лабораторной установки



$b =$ мм; $h =$ мм;

$$J_{\min} = \frac{bh^3}{12} = \quad ;$$

модуль Юнга $E =$ МПа.

Таблица наблюдений

Q	Показания БИУ, кН	Показания ИД, мкОм/кОм тензорезисторов
n_0	0	
n_1	0,01	

Таблица наблюдений

F	Показания БИУ, кН	Показания ИД, мкОм/кОм тензорезисторов
n_2	0,03	
n_3	0,1	
n_4	0,15	
n_5	0,2	
n_6	0,25	

Определение прогиба балки от поперечной силы Q как разность показаний индикатора

$$v_n = n_1 - n_0 = \quad \text{м.}$$

Определение прогиба балки от действия продольной силы F :

$$\Delta v_i = (n_{i+1} - n_1),$$

$$\Delta v_1 = \quad \text{м,}$$

$$\Delta v_2 = \quad \text{м,}$$

$$\Delta v_3 = \quad \text{м,}$$

$$\Delta v_4 = \quad \text{м,}$$

$$\Delta v_5 = \quad \text{м.}$$

Вычисление полного прогиба балки от действия продольной и поперечной нагрузок:

$$v_i = n_{i+1} - n_0,$$

$$\begin{aligned} v_1 &= & \text{М,} \\ v_2 &= & \text{М,} \\ v_3 &= & \text{М,} \\ v_4 &= & \text{М,} \\ v_5 &= & \text{М.} \end{aligned}$$

Вычисление теоретических значений прогибов от действия поперечной силы и продольных нагрузок по формулам:

$$v^T = \frac{v_n}{\left(1 - \frac{F}{F_3}\right)} = \text{М;}$$

$$F_3 = F_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 EJ_{\text{min}}}{l^2} = ;$$

$$v_n^T = \frac{Ql^3}{48EJ_{\text{min}}} = \text{М;}$$

$$\Delta v^T = \frac{v_n}{\left(\frac{F_3}{F-1}\right)} = \text{М.}$$

Оценка соответствия теоретических и опытных результатов:

$$\delta_i = \frac{v^T - v_i}{v^T} \cdot 100 \%,$$

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \% , \\ \delta_2 &= \% , \\ \delta_3 &= \% , \\ \delta_4 &= \% , \\ \delta_5 &= \% . \end{aligned}$$

График теоретических значений (отметьте на нем экспериментальные значения).



Выводы по работе _____

Отчет принял

Лабораторная работа № 10

Испытание тонкостенного стержня открытого профиля на изгиб и кручение

В данной работе рассматривается тонкостенный стержень открытого профиля, работающий на изгиб и кручение.

Цель работы — экспериментально определить положение центра изгиба; проверить закон распределения секториальных нормальных напряжений при стесненном кручении.

1. Краткие теоретические сведения

Тонкостенными стержнями называют стержни, у которых размеры поперечного сечения h , b значительно больше значения толщины элементов δ и t , составляющих это сечение (рис. 1).

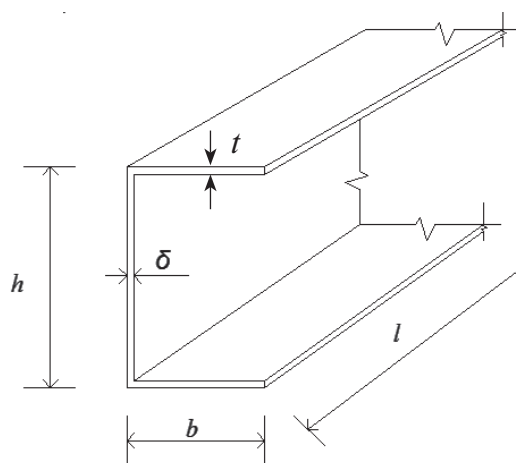


Рис. 1. Тонкостенный стержень

При поперечном изгибе в поперечном сечении тонкостенного стержня наряду с изгибающим моментом возникает поперечная сила Q , которая является равнодействующей внутренних касательных усилий.

Существует такая точка, относительно которой момент касательных сил в сечении равен нулю. Эта точка называется **центром изгиба**. Следовательно, равнодействующая внутренних касательных сил проходит через эту точку. Для тонкостенного стержня открытого профиля, имеющего ось симметрии, центр изгиба (точка A), как и центр тяжести, лежит на этой оси.

Если линия действия внешней силы P проходит через центр изгиба, то стержень будет только изгибаться. При приложении силы P вне центра изгиба стержень помимо поперечного изгиба будет испытывать еще и кручение.

Кручение тонкостенных стержней открытого профиля сопровождается искажением плоскости поперечного сечения, так называемой **депланацией**. Если же развитие депланации стеснено, то в поперечных сечениях стержня возникают нормальные напряжения, связанные с изгибом отдельных элементов стержня. Кручение, сопровождающееся появлением нормальных напряжений в поперечных сечениях, называют **стесненным кручением**. В этом случае в поперечных сечениях стержня возникает *бимомент*:

$$B_{\omega} = \frac{M_z \operatorname{sh}(kz)}{k \operatorname{ch}(kl)},$$

где $M_z = -Pe$ (e — эксцентриситет); k — изгибно-крутильная характеристика, $k = \sqrt{\frac{GJ_{\alpha}}{EJ_{\omega}}}$.

Здесь GJ_{α} — жесткость сечения стержня при свободном кручении; J_{α} — момент инерции при чистом кручении; J_{ω} — секториальный момент инерции поперечного сечения.

Здесь GJ_{α} — жесткость сечения стержня при свободном кручении; J_{α} — момент инерции при чистом кручении; J_{ω} — секториальный момент инерции поперечного сечения.

Нормальные напряжения σ_{ω} , возникающие в поперечных сечениях стержня при стесненном кручении, образуют статически уравновешенную систему сил и определяются по формуле

$$\sigma_{\omega} = \frac{B_{\omega} \omega}{J_{\omega}}, \quad (1)$$

где ω — главная секториальная координата точки, в которой определяются напряжения.

Для поперечного сечения стержня постоянными величинами являются B_{ω} и J_{ω} , поэтому из приведенной выше формулы (2) следует, что секториальные нормальные напряжения σ_{ω} распределяются в сечении по закону главных секториальных координат.

При построении эпюры главных секториальных координат за полюс принимается центр изгиба, а за начало отсчета — главная секториальная точка.

Положение центра изгиба находится из условия равенства нулю момента касательных сил, действующих в поперечном сечении стержня,

$$\sum M_A = 0, \quad Q\alpha_x - Sh = 0, \quad (2)$$

откуда α_x — координаты центра изгиба, $\alpha_x = Sh / Q$.

Выражая силу S , связанную с касательными напряжениями в полках стержня шириной b и толщиной t , через Q и подставляя ее в формулу (2), получим

$$\alpha_x = \frac{3b^2 t}{6bt + h\delta}.$$

2. Описание лабораторной установки

Внешний вид комплекса приведен на рис. 2. Комплекс представляет собой лабораторный стол с соответствующей наладкой (рис. 3), хранимой в одном из трех ящиков и устанавливаемой на столе при проведении лабораторной работы. Стол состоит из каркаса 7, встроенной установочной плиты 4 сварной конструкции с Т-образным пазом на верхней плоскости для закрепления элементов наладки 3, набора выдвижных ящиков 5 для хранения этих элементов, роликов (колес) 6 для удобства передвижения стола в пределах лаборатории и четырех опор 8 для установки стола по уровню перед проведением лаборатор-

ных работ. На столе находится измеритель деформации (ИД) 1 тензометрический цифровой ИДТЦ-01 (см. прил. 1) и блок измерения усилий (БИУ) 2 (см. прил. 2). При проведении лабораторных работ ИД и БИУ подключаются к источнику питания согласно паспортам.

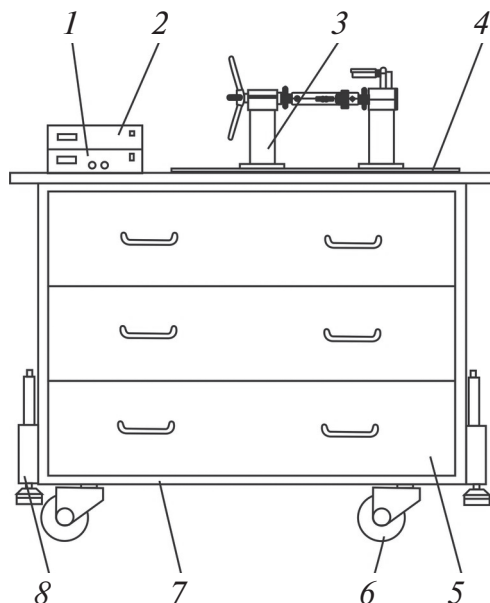
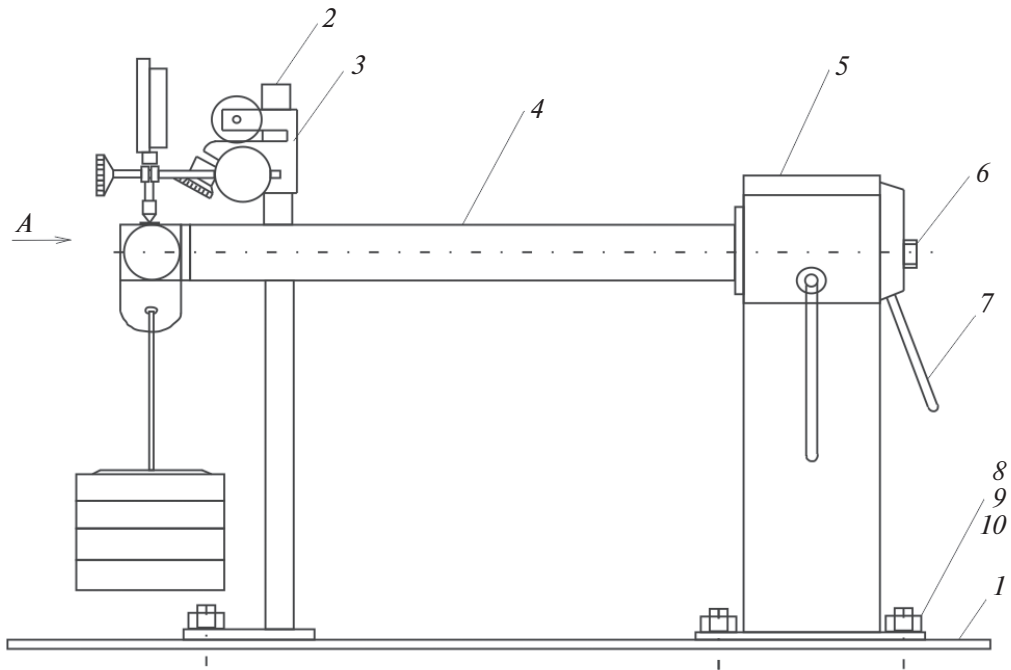


Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки

Наладка, используемая в данной лабораторной работе, показана на рис. 3. Установите опорную стойку 5 и индикаторную стойку 2 на плите стола 1 и закрепите болтовыми соединениями: болтом 8, гайкой 9, шайбой 10. Вставьте образец 4 — балку в сборе с поперечной рамкой,двигающейся в ней подвижной серьгой 15, и зафиксируйте центральным болтом 6 рукоятки 7. Наденьте на индикаторную стойку 2 бобышку 3 и предварительно зафиксируйте. Вставьте в отверстие бобышки 3 стержень 11, а в отверстие стержня — кронштейн 12 с закрепленными на ней двумя индикаторными головками 13.

Выставьте систему так, чтобы ножки индикаторов опирались на опорные пятачки поперечной рамки и закрепите, при этом показания индикаторов должны быть одинаковыми. Вставьте подвес 16 в отверстие подвижной серьги 15 и нагрузите гирями 17. Двигая серьгу 15 вдоль поперечной рамки, винтом 14 меняйте точку приложения нагружающей силы, при этом показания индикаторов будут меняться.



Вид А

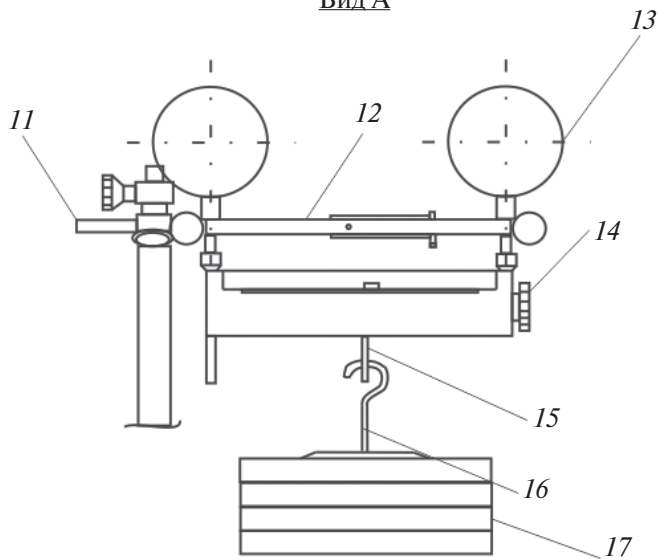


Рис. 3. Наладка:

1 — плита стола; 2 — индикаторная стойка; 3 — бобышка; 4 — образец; 5 — опорная стойка; 6 — центральный болт; 7 — рукоятка; 8 — болт; 9 — гайка; 10 — шайба; 11 — стержень; 12 — кронштейн; 13 — индикаторная головка; 14 — винт; 15 — подвижная серьга; 16 — подвес; 17 — гири

Технические характеристики рассматриваемого стержня тонкостенного П-образного сечения для изучения изгиба и кручения открытых профилей:

длина рабочей части, мм.....	650±2,0
ширина полки, мм	20±1,0
высота, мм	30±1,0
материал	сталь 45

3. Порядок выполнения работы

Лабораторную работу выполняют в следующем порядке:

- 1) соберите наладку согласно рис. 3;
- 2) нагрузите стержень силой 10 Н. Медленно перемещая груз по рамке при помощи винта, добейтесь положения, когда показания индикаторов сравняются, что соответствует приложению нагрузки в центре изгиба;
- 3) по шкале рамки определите координату центра изгиба и снимите показания ИД для всех тензорезисторов;
- 4) нагрузите стержень последовательно силой 20, 30, 40 Н. На каждом уровне снимите показания тензорезисторов;
- 5) определите относительную деформацию стержня и напряжения во всех четырех точках исследуемого сечения по формулам:

$$\varepsilon = K_{\varepsilon} \cdot \Delta n ,$$

$$\sigma = E\varepsilon ,$$

где K_{ε} — цена деления единицы дискретности ИД при измерениях деформации; Δn — средняя разность показаний ИД, соответствующая приращению силы 10 Н; E — модуль упругости материала (стали), $E = 2 \cdot 10^5$ МПа;

- 6) стержень разгрузите и перевесьте подвеску на неподвижную серьгу;
- 7) повторите опыт в соответствии с п. 4, 5;
- 8) постройте эпюры напряжений по результатам эксперимента;

- 9) определите теоретические значения напряжений и координату центра изгиба;
- 10) постройте эпюры теоретических напряжений;
- 11) сравните результаты эксперимента и расчета.

4. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) краткое изложение теоретических основ;
- 3) описание лабораторной установки и назначение отдельных блоков;
- 4) таблицу с первичным экспериментальным материалом;
- 5) вычисленные значения нормальных напряжений для точек зоны чистого изгиба;
- 6) эпюру теоретических напряжений в сечении зоны чистого изгиба с отмеченными значениями экспериментально полученных напряжений;
- 7) выводы по работе.

Перечень контрольных вопросов

1. В чем особенность кручения стержней тонкостенного открытого профиля?
2. Какое кручение называется стесненным?
3. Что такое депланация?
4. Запишите формулу для бимоента.
5. В каком случае в поперечных сечениях стержня возникает бимомент?
6. Что такое центр изгиба?

ОТЧЕТ О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Испытание тонкостенного стержня открытого профиля на изгиб и кручение

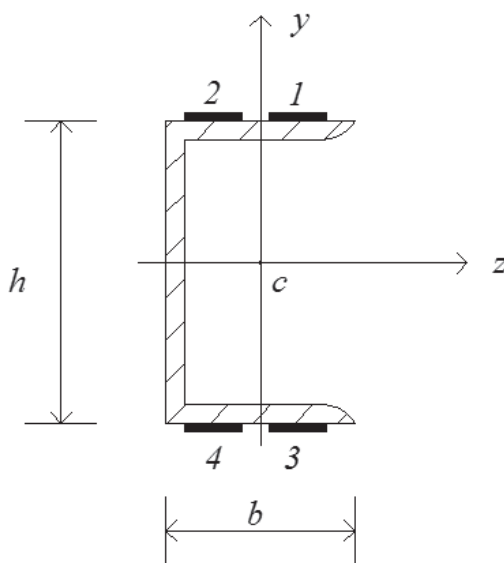
Цель работы: _____

Краткое изложение теоретических основ: _____

Измерительные приборы: _____

Цена единицы дискретности ИД при измерениях деформации $K_\epsilon =$,
модуль Юнга $E =$ МПа.

Схема образца лабораторной установки



Данные об образце:

$h =$ мм;

$b =$ мм;

$\delta = t =$ мм.

Определение координат центра изгиба по шкале рамки

1) Подвеска с нагрузкой на подвижной серье:

Таблица наблюдений

Нагрузка, кН (показания БИУ)	Показания n^i ИД, мкОм/кОм (для i -го тензорезистора)			
	1	2	3	4
0,01				
0,02				
0,03				
0,04				

Средняя разность Δn_i показаний тензорезисторов для ступени нагрузки $\Delta P = 0,01$ кН:

$$\Delta n^i = \frac{\sum_{j=1}^3 (n_{j+1}^i - n_j^i)}{3},$$

где n_j^i — показание ИД на i -м тензорезисторе при j -м нагружении; $i = 1, \dots, 4; j = 1, \dots, 3$.

$\Delta n^1 =$ мкОм/кОм;

$\Delta n^2 =$ мкОм/кОм;

$\Delta n^3 =$ мкОм/кОм;

$\Delta n^4 =$ мкОм/кОм.

Опытное значение относительной деформации стержня:

$$\varepsilon^i = K_\varepsilon \Delta n^i ,$$

$$\begin{aligned} \varepsilon^1 &= & ; \\ \varepsilon^2 &= & ; \\ \varepsilon^3 &= & ; \\ \varepsilon^4 &= & . \end{aligned}$$

Опытное значение напряжений во всех точках исследуемого сечения:

$$\sigma^i = E \varepsilon^i ,$$

$$\begin{aligned} \sigma^1 &= & \text{МПа;} \\ \sigma^2 &= & \text{МПа;} \\ \sigma^3 &= & \text{МПа;} \\ \sigma^4 &= & \text{МПа.} \end{aligned}$$

2) Подвеска с нагрузкой на неподвижной серьге:

Таблица наблюдений

Нагрузка, кН (показания БИУ)	Показания n^i ИД, мкОм/кОм (для i -го тензорезистора)			
	1	2	3	4
0,01				
0,02				
0,03				
0,04				

Средняя разность Δn^i показаний тензорезисторов для ступени нагрузки $\Delta P = 0,01$ кН:

$$\begin{aligned} \Delta n^1 &= & \text{мкОм/кОм;} \\ \Delta n^2 &= & \text{мкОм/кОм;} \\ \Delta n^3 &= & \text{мкОм/кОм;} \\ \Delta n^4 &= & \text{мкОм/кОм.} \end{aligned}$$

Опытное значение относительной деформации стержня:

$$\varepsilon^i = K_\varepsilon \Delta n^i ,$$

$$\begin{aligned} \varepsilon^1 &= & ; \\ \varepsilon^2 &= & ; \\ \varepsilon^3 &= & ; \\ \varepsilon^4 &= & . \end{aligned}$$

Опытное значение напряжений во всех точках исследуемого сечения:

$$\sigma^i = E \varepsilon^i ,$$

$$\begin{aligned} \sigma^1 &= & \text{МПа;} \\ \sigma^2 &= & \text{МПа;} \\ \sigma^3 &= & \text{МПа;} \\ \sigma^4 &= & \text{МПа.} \end{aligned}$$

Определение теоретических значений

$$\alpha_x = \frac{3b^2 t}{6bt + h\delta} = ;$$

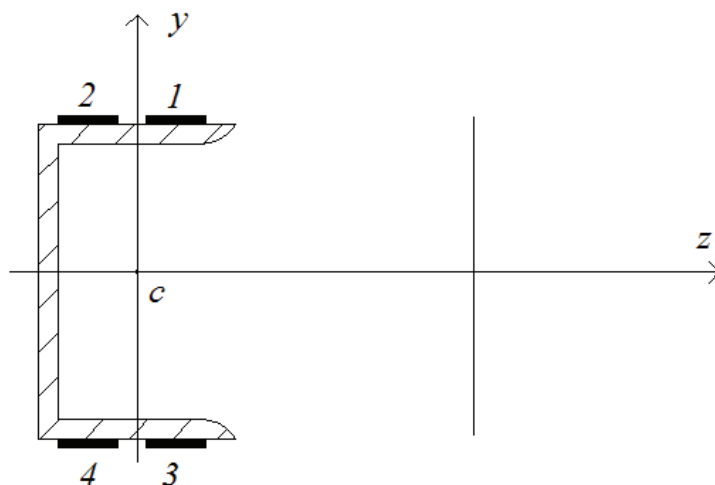
$$M_z = -Pe = ;$$

$$k = \sqrt{\frac{GJ_\alpha}{EJ_\omega}} = ;$$

$$B_\omega = \frac{M_z \operatorname{sh}(kz)}{k \operatorname{ch}(kl)} = ;$$

$$\sigma_\omega = \frac{B_\omega \omega}{J_\omega} = .$$

Эпюра теоретических напряжений в сечении



Выводы по работе _____

Отчет принял

Поляков А. А. Сопротивление материалов и основы теории упругости / А. А. Поляков, В. М. Кольцов. — Екатеринбург : УрФУ, 2011. 527 с.

Дарков А. В. Сопротивление материалов / А. В. Дарков, Г. С. Шпиро. — М. : Высшая школа, 1975. 654 с.

Приложение 1

Измеритель деформации тензометрический цифровой ИДТЦ-01

1. Назначение

Измеритель деформации тензометрический цифровой ИДТЦ-01 (далее — прибор) применяется для измерения деформаций при статическом напряжении и используется в составе универсальных стендов СМ-1, СМ-2 при выполнении практикумов по дисциплинам «Сопротивление материалов», «Строительная механика», «Техническая механика» в высших и средних профессиональных учебных заведениях машиностроительного и приборостроительного профиля и предназначен для работы при температурах от +10 до +35 °С, относительной влажности воздуха до 80 % при 25 °С.

2. Основные технические данные

- 2.1. Электрическая схема соединений тензорезисторов на объекте измерений — полумост.
- 2.2. Диапазон измерений, мкОм/Ом..... ± 5999 .
- 2.3. Количество сдвигов диапазона измерений переключателем ДИАПАЗОН:
в положительную сторону..... 5;
в отрицательную сторону..... 5.
- 2.4. Дискретный шаг сдвига диапазона измерений переключателем ДИАПАЗОН, единиц индикации $\pm (1000 \pm 10)$.
- 2.5. Напряжение питания полумоста, В..... $9 \pm 0,2$.
- 2.6. Номинальное сопротивление применяемых на объекте измерений тензорезисторов, Ом..... от 100 до 400.
- 2.7. Стабильность показаний прибора при неоднократных измерениях деформации, единиц индикации, не более..... 5.

2.8. Количество измерительных каналов	11.
2.9. Длина соединительного кабеля между прибором и объектом измерений, м, не более	12.
2.10. Потребляемая мощность, $В \cdot А$, не более	10.
2.11. Электропитание прибора от сети переменного тока:	
напряжение, В	220 ± 22 .
частота, Гц	$50 \pm 0,4$.
2.12. Габаритные размеры, мм, не более:	
длина	260;
ширина	180;
высота	77.
2.13. Масса, кг, не более	2,5.
2.14. Средний срок службы до списания, лет, не менее	5.
2.15. Готовность прибора к работе после включения, мин	10.

3. Комплектность

Комплект поставки должен соответствовать указанному:

Измеритель деформации тензометрический цифровой ИДТЦ-01	1 шт.
Кабель соединительный	1 шт.
Паспорт измерителя деформации тензометрического цифрового ИДТЦ-01	1 шт.

4. Меры безопасности

- 4.1. К работе с прибором допускаются лица, ознакомленные с его устройством, принципом действия и мерами безопасности в соответствии с требованиями, приведенными в настоящем разделе.
- 4.2. По требованиям электробезопасности прибор соответствует классу защиты от поражения электрическим током ГОСТ 12.2.007.0–75.
- 4.3. Запрещается эксплуатация прибора, а также любые ремонтные работы со снятым кожухом без отключения его от сети с помощью сетевой вилки.
- 4.4. Запрещается во время работы отключать кабель, соединяющий между собой прибор и объект измерений.

5. Устройство и принцип работы

5.1. Внешний вид изделия приведен на рис. П1.

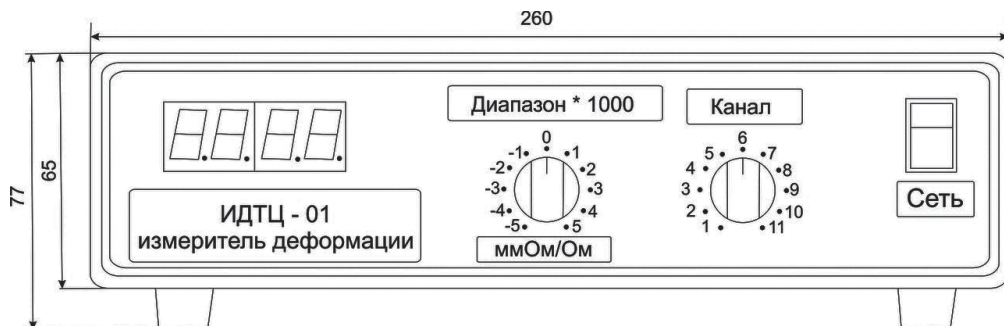


Рис. П1. Внешний вид измерителя деформации

5.2. Прибор содержит следующие блоки:

- блок питания;
- блок измерительного устройства;
- блок индикации.

На лицевой панели находятся индикатор, переключатели КАНАЛ, ДИАПАЗОН, переключатель сетевой с подсветкой. На задней стенке находится разъем для подключения к прибору соединительного кабеля, сетевой предохранитель, шнур электропитания.

5.3. Прибор позволяет измерять электрические сигналы с тензорезисторов и представлять результаты измерений в цифровом виде.

В блоке применен 3,5-разрядный АЦП. В качестве индикаторов используются семисегментные светодиодные матрицы.

6. Подготовка к работе

- 6.1. Произведите внешний осмотр прибора на наличие видимых повреждений и отсутствие оборванных проводов.
- 6.2. Подключите прибор к объекту измерений с помощью кабеля, входящего в состав прибора.
- 6.3. Подключите сетевой шнур к сети переменного тока 220 В, 50 Гц.

7. Порядок работы

- 7.1. Включите переключатель сетевой с подсветкой. При этом индикатор высвечивает любое цифровое показание.
- 7.2. Переключателем КАНАЛ выберите нужный тензорезистор.
- 7.3. В случае разбаланса выбранного канала происходит переполнение индикатора (горит «-1» или «1» только в старшем разряде индикатора), необходимо в соответствии со знаком в старшем разряде, путем поворота переключателя ДИАПАЗОН в ту или иную сторону, добиться показаний в младших разрядах индикатора.
Измеряемое показание будет соответствовать алгебраической сумме показаний индикатора и положению переключателя ДИАПАЗОН. Данные значения могут быть как положительными, так и отрицательными.
- 7.4. Если в процессе измерений произойдет переполнение индикатора, то следует повторить действия по п. 7.3.

Приложение 2

Блок измерения усилий

1. Назначение

Блок измерения усилий (далее — блок) предназначен для измерения силы, действующей в одной координатной плоскости и приложенной к датчику усилия ГИЯА 408661.001 в статическом режиме. Блок и датчики рассчитаны на измерение усилий в трех диапазонах: от 0 до 0,05 кН; от 0,05 до 0,5 кН; от 0,5 до 5,0 кН — при выполнении лабораторных работ на комплексе универсальном учебном СМ-1.

2. Технические характеристики

- 2.1. Потребляемая мощность, $В \cdot А$, не более..... 10.
- 2.2. Электропитание от сети переменного тока:
 - напряжение, В..... 220 ± 20 ;
 - частота, Гц $50 \pm 0,4$.
- 2.3. Погрешность измерения, %, не более.....5.
- 2.4. Габаритные размеры блока, мм, не более
 - длина.....260;
 - ширина180;
 - высота60.
- 2.5. Габаритные размеры датчика усилий, мм, не более
 - длина.....100;
 - ширина50;
 - высота85.
- 2.6. Масса блока, кг, не более2,5.
- 2.7. Средний срок службы до списания, лет, не менее.....5.
- 2.8. Готовность прибора к работе после включения, мин 10.

3. Устройство и принцип работы

3.1. Внешний вид блока приведен на рис. П2.

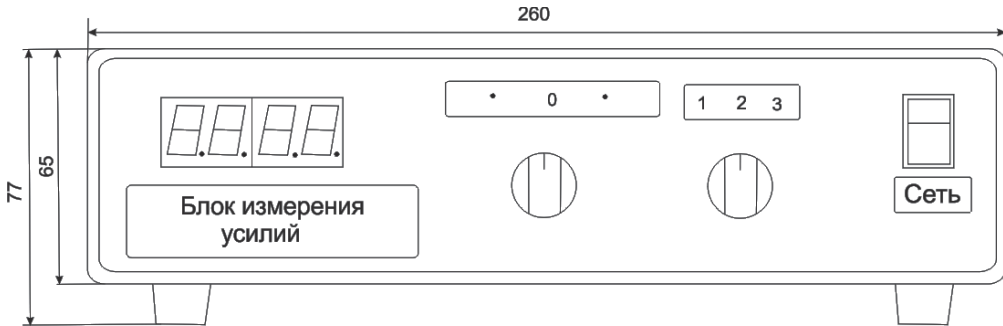


Рис. П2. Внешний вид блока измерения усилий

3.2. Блок предназначен для измерения силы, действующей на датчик усилий в трех диапазонах (от 0 до 0,05 кН; от 0,05 до 0,5 кН; от 0,5 до 5,0 кН), и вывода результатов измерений на цифровое табло индикации с отображением знака прилагаемого усилия: «-» — усилие сжатия, отсутствие знака — усилие растяжения.

Органы управления и индикации выведены на лицевую панель блока. Имеется кнопка включения питающего напряжения, цифровое табло отображения результатов измерений, переключатель диапазонов измерения, регулятор установки «0». Через соединительный кабель к блоку подключается один из датчиков усилия.

3.3. Датчик усилий — тензометрический преобразователь, предназначенный для преобразования механической деформации в электрический сигнал.

Для измерений силы в трех диапазонах используется три датчика.

Датчик усилий выполнен в виде скобы. На скобу наклеены тензорезисторы, которые соединены электрическими проводами по схеме полумоста и выведены на общий разъем датчика.

4. Указание мер безопасности

- 4.1. К работе с блоком допускаются лица, ознакомленные с его устройством, принципом действия и мерами безопасности в соответствии с требованиями, приведенными в настоящем разделе.
- 4.2. Произведите работы, связанные с подготовкой блока к эксплуатации, его обслуживанием, не подключая блок к питающей сети.
- 4.3. Запрещается во время работы отключать кабель, соединяющий между собой блок и датчик усилий.
- 4.4. Во избежание поломки измерительной скобы датчика запрещается нагружать выбранный датчик усилием, большим, чем максимальное указанное на датчике.
- 4.5. Запрещается работа с блоком при открытой крышке.
- 4.6. После проведения работы с блоком необходимо отключать блок от сети питания.

5. Подготовка к работе

- 5.1. Соедините блок с датчиком усилий кабелем.
- 5.2. Подключите блок к сети питания.
- 5.3. Нажмите кнопку включения питающего напряжения на лицевой панели — должно засветиться цифровое табло индикации.
- 5.4. Дайте прогреться прибору не менее 10 мин.

6. Порядок проведения работы

- 6.1. Установите переключатель диапазона измерений в соответствии с приведенными данными в положение, соответствующее максимальному значению измеряемых усилий подключенного датчика, кН:

1	0,05
2	0,5
3	5,0

6.2. Выставить ручкой регулятора «Установи “нуль”» на цифровом табло в трех младших разрядах — «000». Установка «000» производится после каждого снятия нагрузки.

Установка «0» производится при подключенных датчиках усилий в соответствии с воздействием на них нагружающей силы.

6.3. Производить нагружение образца и измерение усилий согласно паспорту на комплекс универсальный учебный СМ-1.

Приложение 3

Микрометрическая головка

1. Назначение

Микрометрическая головка (модель 210121, класс точности 2) предназначена для использования в качестве измерительного узла в устройствах для измерения линейных размеров.

Вид климатического исполнения УХЛ 4.2* по ГОСТ 15150–69.

Условием эксплуатации является температура окружающей среды от +10 до +30 °С

Обозначение при заказе — микрометр МГ 25-2 модель 200121 ТУ2.034-19–87.

2. Технические характеристики

2.1. Класс точности	2.
2.2. Перемещение микровинта, мм	25.
2.3. Цена деления, мм	0,01.
2.4. Предел допускаемой погрешности, мм	±0,003.
2.5. Габаритные размеры, мм.....	21×115.
2.6. Средняя наработка на отказ головки должна быть условных измерений, не менее	100 000.
2.7. Масса, кг	0,175.

3. Комплектность

- 3.1. Микрометрическая головка.
- 3.2. Ключ.
- 3.3. Коробка.
- 3.4. Паспорт.

4. Подготовка микрометрической головки к работе

Установить головку (рис. ПЗ) в устройство, протереть измерительную поверхность, проверить плавность хода.

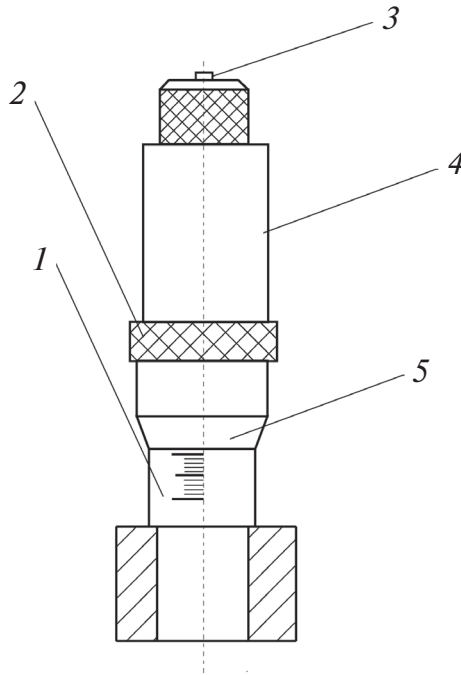


Рис. ПЗ. Внешний вид микрометрической головки:

1 — шкала стебля; 2 — микровинт; 3 — винт стопора барабана; 4 — барабан; 5 — шкала

Поскольку погрешность головки определена при установленном положении барабана 4, переставлять барабан не следует; если требуется смещение шкалы 5 барабана относительно шкалы стебля 1, отвернуть ключом винт стопора 3 барабана, установить барабан в требуемом положении, закрепить ключом винт стопора барабана (при этом усилие, приложенное к ключу, не должно превышать 0,5 кг) и убедиться в правильности нулевой установки. Производить отсчет по шкале головки (для повышения точности) только при движении микровинта 2 вперед (при ввинчивании).

5. Техническое обслуживание

После окончания работы измерительную поверхность головки протереть и смазать техническим вазелином.

6. Методы и средства поверки

6.1. Условие поверки — температура $(20 \pm 4)^\circ\text{C}$.

6.2. Методы и средства поверки — по методическим указаниям МИ 782—85.

Учебное издание

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Составители:

Кислов Алексей Николаевич,
Поляков Алексей Афанасьевич,
Лялина Фарида Галиевна,
Ковалев Олег Сергеевич,
Чупин Владимир Васильевич,
Черногубов Дмитрий Евгеньевич

Редактор И. В. Меркурьева
Верстка О. П. Игнатьевой

Подписано в печать 08.10.2015. Формат 70×100/16.
Бумага писчая. Плоская печать. Гарнитура Newton.
Уч.-изд. л. 6,7. Усл. печ. л. 10,3. Тираж 100 экз.
Заказ 284

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: 8 (343) 350-56-64, 350-90-13
Факс: 8 (343) 358-93-06
E-mail: press-urfu@mail.ru

